www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

12e JAARGANG No. 9, blz. 245-276 SEPTEMBER 1950

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

HET SYNCHROCYCLOTRON TE AMSTERDAM

I. ALGEMEEN OVERZICHT VAN DE INSTALLATIE

II. DE OSCILLATOR EN DE MODULATOR

door F. A. HEYN *).

621.384.61

Mededelingen over cyclotrons hebben vaak enigszins de schijn, dat zij zijn opgesteld pour épater le bourgeois: meters dikke magneetpolen, honderden tonnen ijzer, tientallen kilowatt, snelheden nabij de lichtsnelheid, enz. Zonder een poging te doen het epatante te verdoezelen, wordt in deze beschrijving van het Philips synchrocyclotron getracht te laten zien wat de oorzaken zijn waardoor men bij het maken van een cyclotron in talrijke opzichten tot ongewone constructies gedwongen wordt.

I. ALGEMEEN OVERZICHT VAN DE INSTALLATIE

Door Philips is een synchrocyclotron gebouwd, dat geplaatst is in het Instituut voor Kernphysisch Onderzoek (I.K.O.) te Amsterdam en dat op 10 November 1949 officieel in gebruik werd genomen. Het toestel werkt thans dag in, dag uit, en er zijn slechts enkele onderbrekingen voor revisies nodig gebleken. Het toestel wordt in bedrijf gehouden door de N.V. Philips, die $^2/_3$ van de bedrijfstijd ter beschikking heeft voor eigen onderzoek en voor de vervaardiging van kunstmatig radioactieve stoffen, die bij allerlei onderzoekingen op medisch, biologisch en technisch gebied worden gebruikt. Gedurende $^1/_3$ van de bedrijfstijd staat de bundel van versnelde deeltjes, die het toestel levert, ter beschikking voor algemeen wetenschappelijk onderzoek. Ook onderzoekers aan Nederlandse universiteiten en hogescholen, die met het cyclotron proeven willen doen en die daartoe van het I.K.O. toestemming hebben verkregen, kunnen hiervan profiteren.

In dit artikel (I) zal een beknopt algemeen overzicht van de constructie van dit synchrocyclotron en van de tot nu toe hiermee bereikte resultaten worden gegeven. Vervolgens zullen in enige afzonderlijke artikelen de voornaamste onderdelen van de installatie worden behandeld. Het eerste van deze artikelen (II) sluit onmiddellijk op het overzicht aan.

De theoretische grondslagen van het cyclotron zijn enige maanden geleden in een artikel in dit tijdschrift [1]) besproken (in het vervolg aangehaald als A). De belangrijkste feiten en formules zullen hier, waar dit nodig is, voor het gemak van de lezer worden herhaald.

We stappen in medias res en geven in *fig. 1a* en *b* een schematische tekening van het hoofdgedeelte van de installatie, het eigenlijke versnellingsapparaat. *Fig. 2*, een foto van een maquette van het apparaat in gedeeltelijk gedemonteerde toestand, zal het begrijpen van de tekening vergemakkelijken.

In de tekening ziet men de geëvacueerde versnellingskamer *1*, waarin de te versnellen deeltjes, in ons geval hetzij deuteronen (ionen van zware waterstof) hetzij α-deeltjes (dubbel geïoniseerde helium-

*) Hoogleraar aan de Technische Hogeschool te Delft, voordien verbonden aan het Philips-laboratorium te Eindhoven.

[1]) W. de Groot, Cyclotron en synchrocyclotron, Philips techn. T. **12**, 65-72, 1950 (No. 3).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

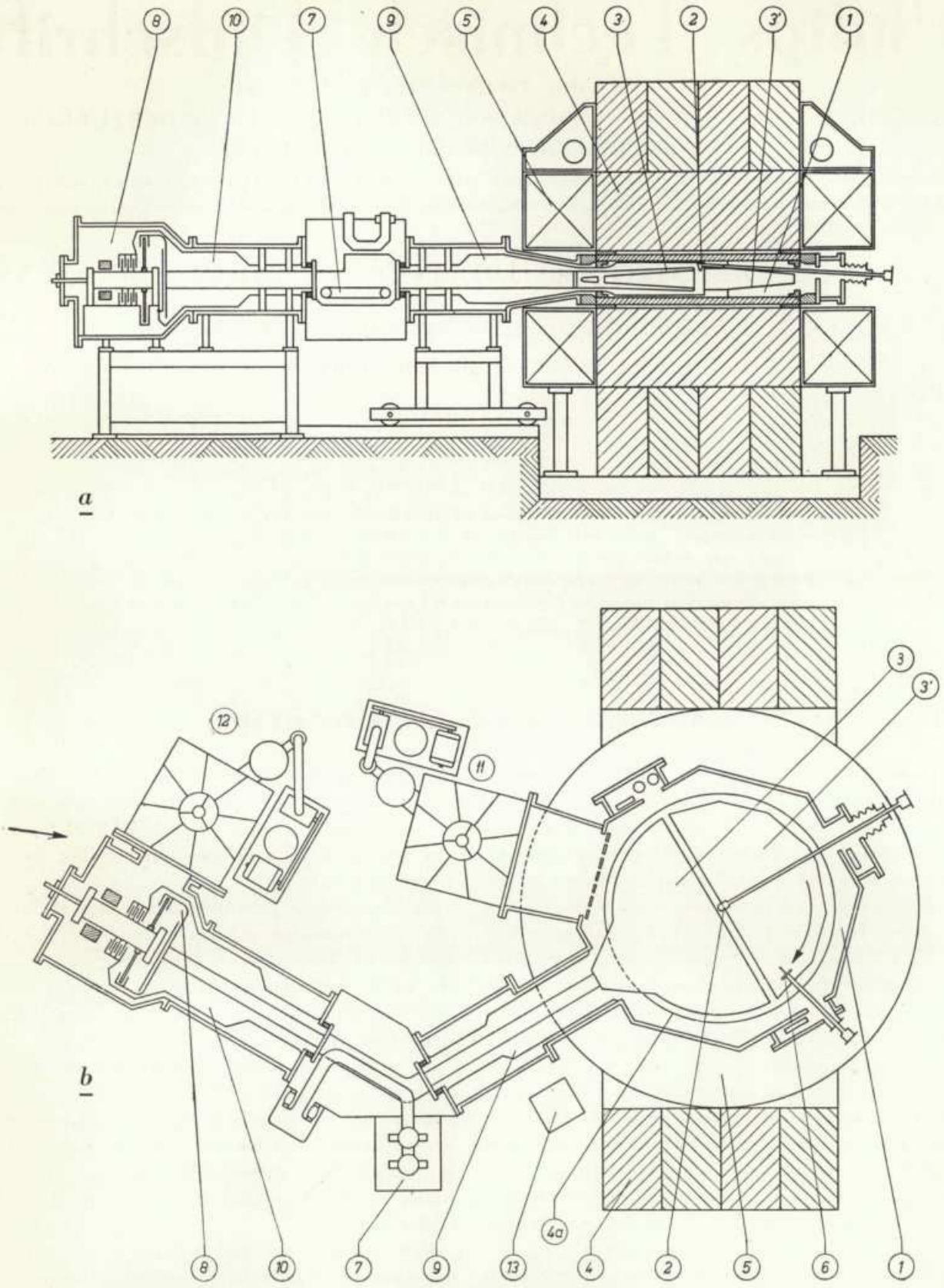


Fig. 1. Sterk vereenvoudigde verticale en horizontale doorsnede van het Philips synchrocyclotron te Amsterdam. (De verticale doorsnede, *a*, is feitelijk een aaneenvoeging van twee doorsneden, langs de hartlijnen van *9* en *10* in *b*.) *1* geëvacueerde versnellingskamer, *2* ionenbron, *3* en *3'* Dee's, *4* magneet, *4a* eindvlak van magneetpool, *5* bekrachtigingspoelen, *6* vangschijf, *7* buizen en andere onderdelen van de oscillator, *8* modulator, *9* en *10* coaxiaal Lechersysteem, *11* en *12* vacuumpompen, *13* boriumionisatiekamer.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

atomen), worden gebracht door de ionenbron *2*. Een wisselspanning van de orde van grootte van 15 kV_{top} tussen de Dee's (*3* en *3'*) versnelt de deeltjes. Het magnetische veld van de grote, met behulp van de spoelen *5* bekrachtigde magneet *4* doet de deeltjes een cirkelbaan beschrijven, met een zodanige omlooptijd dat zij telkens in de goede faze bij de spleet tussen de Dee's terugkomen om opnieuw een versnellende werking van de wisselende spanning te ondergaan, al wordt de straal van de cirkelbaan met toenemende energie van de deeltjes steeds groter. De te bereiken eindenergie wordt geheel bepaald door de inductie B van het magneetveld en de uiteindelijke straal r van de cirkelbaan [2]). In ons geval is $B = 1{,}38$ Wb/m² (13 800 gauss) en $r = 78$ cm, waaruit volgt dat deuteronen kunnen worden versneld tot een eindenergie van 28 millioen electronvolt en α-deeltjes tot 56 MeV.

Voor het opwekken van het genoemde magnetische veld in het grote interferricum (diameter der magneetpolen 1,80 m, poolafstand 36 cm) is een hoeveelheid van 200 ton ijzer in de magneet verwerkt, terwijl de bekrachtigingspoelen 32 ton koper bevatten en met 180 ampère worden gevoed. Het benodigde electrisch vermogen om de koperverliezen te dekken is 80 kW, een koeling door olie voert dit vermogen af. De poolafstand is zo groot gekozen (ook groot in vergelijking met analoge installaties) om een zeer intensieve bundel van deeltjes te kunnen produceren, hetgeen voor de wijze van exploiteren van het synchrocyclotron die bij ontwerp voor ogen stond, bijzonder belangrijk was. Het verband tussen poolafstand en bundelintensiteit wordt duidelijk wanneer men bedenkt, dat de ideale baan der deeltjes weliswaar door een geschikt veldverloop gestabiliseerd wordt in het middenvlak van het interferricum, doch dat de deeltjes een verticale (en radiale) slingerbeweging om deze ideale baan kunnen uitvoeren. Hoe meer ruimte voor de verticale uitwijkingen gelaten wordt, dwz. hoe hoger de versnellingskamer is, des te meer deeltjes kunnen de dreigende botsing tegen de wanden van de Dee's ontlopen en tot het einde aan de versnelling deelhebben.

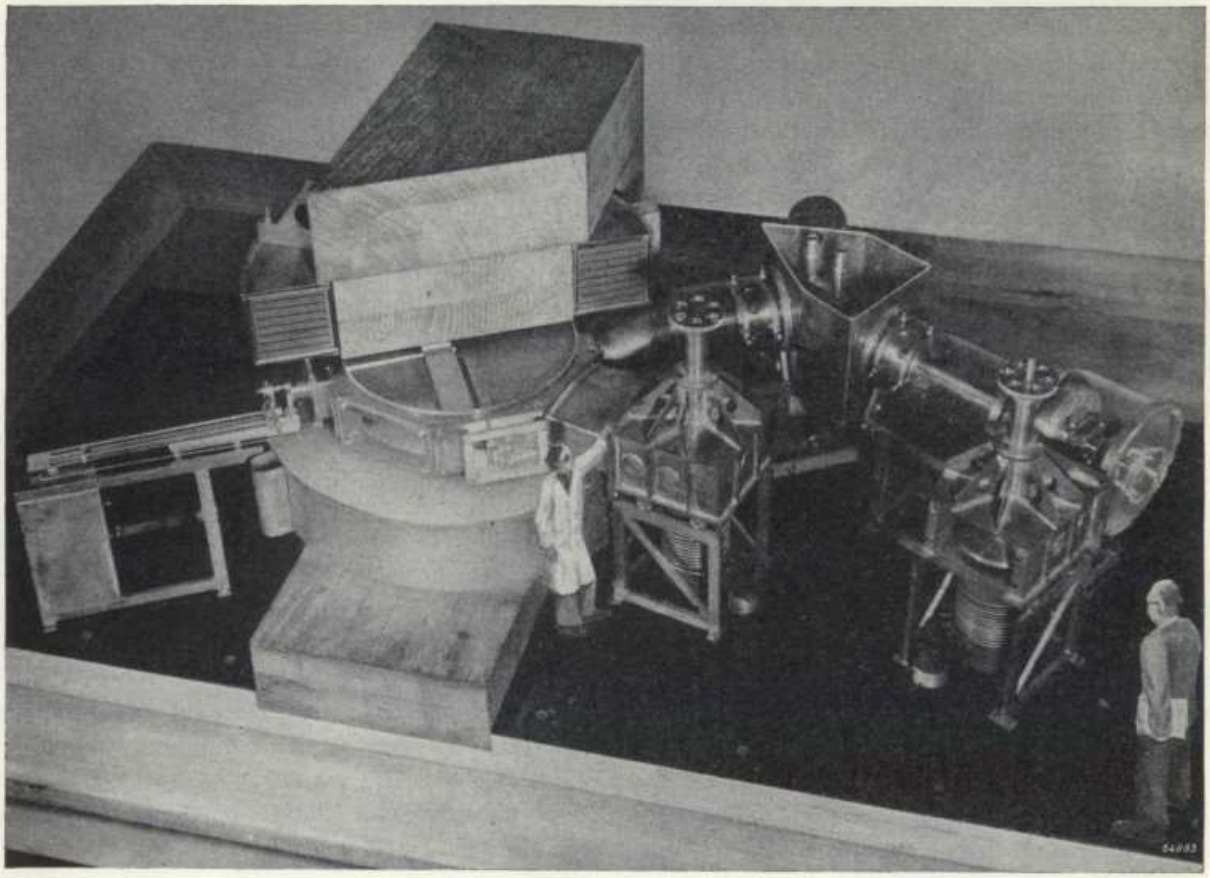


Fig. 2. Maquette van het synchrocyclotron. Doordat de magneet hier gedeeltelijk afgebroken is, kan men de versnellingskamer met de beide Dee's zien.

[2]) Zie bijv. Philips techn. T. **11**, 70, 1949 (No. 3).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De bundel versnelde deeltjes wordt opgevangen op de vangschijf *6* (target), die men meer of minder diep in de versnellingskamer kan schuiven om de energie der opgevangen deeltjes te variëren. Op de vangschijf kunnen de stoffen worden aangebracht die men wil transmuteren. Het is gelukt, vooral ook dank zij een geschikte constructie van de ionenbron, de bundelintensiteit van ons synchrocyclotron tot nu toe reeds zover op te voeren dat de gemiddelde stroomsterkte, die de geladen deeltjes (deuteronen) naar de vangschijf transporteren, 20 microampère bedraagt. Dit is als een hoge waarde te beschouwen. Op de vangschijf wordt hierbij een vermogen van $28 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 560$ watt omgezet in warmte, die door waterkoeling moet worden afgevoerd (door meting van deze warmte komen we juist de stroomsterkte te weten). Ook de Dee's en vele andere onderdelen worden met water gekoeld.

De vereiste wisselspanning tussen de Dee's wordt opgewekt met behulp van een oscillatorschakeling (7 in fig. 1). Voor het versnellen van deeltjes met een massa m en een lading q moet de wisselspanning de hoekfrequentie $\omega_E = qB/m$ hebben (zie A). Voor deuteronen zowel als voor α-deeltjes wordt derhalve, bij de genoemde waarde van B, de benodigde frequentie 10,7 MHz. Voor het versnellen van protonen zou de dubbele frequentie nodig zijn.

Daar het destijds niet doenlijk leek de oscillator voor beide frequenties geschikt te maken, was het een der eerste stappen bij het ontwerpen van ons synchrocyclotron, te besluiten, met welke deeltjes zou worden gewerkt. Gelukkig is deze keuze niet zeer kritisch: zowel met deuteronen als met protonen kan men een groot aantal kernreacties doen plaats hebben, die een grote verscheidenheid van radioactieve stoffen opleveren, waaronder stoffen die niet uit een uraniumoven kunnen worden gewonnen. Wèl kan men zeggen, als men de nuttigheid van protonen en deuteronen tegen elkaar afweegt, dat deuteronen, bij een energie van enige tientallen MeV, bepaald beter geschikt zijn om neutronen te produceren, en dat zij misschien in het algemeen meer universele toepassingsmogelijkheden bieden. Hoe dit ook zij, het stond vast dat bij de keuze van de (lagere) deuteronen-frequentie de constructie van de oscillator en vooral van de modulator minder moeilijkheden zou veroorzaken, zodat de beslissing in ons geval ten gunste van de deuteronen uitviel.

De modulator zien we in fig. 1 als *8* aangegeven. We halen even op wat de functie van dit belangrijke onderdeel is (voor een uitvoerige uiteenzetting, zie A). Zodra de deeltjes in de versnellingskamer een grote energie bereiken, dreigen zij „uit de pas" te geraken: ten eerste doordat zij nader bij de rand van de magneetpolen komen, waar de inductie B noodzakelijk kleiner moet zijn dan in het midden, met het oog op de stabilisatie van de baan der deeltjes; ten tweede doordat de relativistische toeneming van hun massa merkbaar wordt. Door beide oorzaken is dan niet meer voldaan aan de voorwaarde voor synchronisme $\omega_E = qB/m$: de hoekfrequentie ω_E is voor de deeltjes aan de rand te hoog. Dit beperkt de bereikbare eindenergie bij het klassieke cyclotron. Laat men nu echter ω_E geleidelijk afnemen — het principe van het synchrocyclotron —, dan kan men de deeltjes tot grotere eindenergieën versnellen. De gewenste frequentieverandering bewerkstelligt men met de modulator. Dit apparaat bevat een periodiek met de tijd variërende capaciteit, die de afstemming van de oscillator beïnvloedt (moduleert). In dat deel van elke modulatorperiode waarin de oscillatorfrequentie daalt, wordt dan een stroom van deeltjes versneld. Belangrijk is daarbij dat een fazestabilisatie optreedt, die maakt dat de dalende frequentie niet op ieder ogenblik precies behoeft te beantwoorden aan de zich wijzigende situatie bij de toeneming van de baanstraal der individuele deeltjes. Dank zij deze omstandigheid kunnen met het synchrocyclotron sterke, intermitterende bundels van versnelde deeltjes worden verkregen.

De modulatiefrequentie bedraagt bij ons apparaat 2000 Hz, hetgeen betekent dat er 2000 keer per seconde een groep versnelde deeltjes op de vangschijf belandt. Deze relatief hoge modulatiefrequentie, die gunstig is voor het verkrijgen van een grote gemiddelde bundelstroomsterkte — aangezien het aantal versnelde deeltjes per keer in eerste instantie onafhankelijk van de modulatiefrequentie is —, kon technisch goed worden verwezenlijkt dank zij het feit dat de frequentiezwaai in ons geval slechts 4% behoefde te bedragen. De magnetische inductie daalt nl. bij ons apparaat van het midden tot de rand met 2,5%, en de massatoeneming van een deuteron dat aan de rand een kinetische energie van ca 30 MeV heeft verkregen, bedraagt ca 1,6% (de rustenergie van het deuteron is 1840 MeV). Bij ca 4% frequentiedaling is dus aan de rand wederom aan de voorwaarde voor synchronisme $\omega_E = qB/m$ voldaan [3]).

[3]) Dit is eveneens het geval voor α-deeltjes, daar hierbij de rustenergie en de maximaal verkregen kinetische energie beide 2 × zo groot zijn als bij het deuteron; de procentuele massatoeneming is dus wederom ca 1,6 %.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Ter vergelijking vermelden wij hier enkele gegevens van het synchrocyclotron te Harwell in Engeland, dat onlangs in gebruik is genomen [4]). Dit versnelt protonen tot een energie van ca 180 MeV. De relativistische massatoeneming bedraagt dan alleen al ca 20%, en de frequentiezwaai moet ongeveer 30% bedragen. De modulatiefrequentie is voorlopig niet groter dan 80 Hz gemaakt.

Het is gewenst hier nog eens de nadruk er op te leggen dat de grotere bereikbare eindenergie niet het enige voordeel van het synchrocyclotron ten opzichte van het klassieke cyclotron is. In ons geval is de eindenergie der deuteronen 28 MeV, terwijl men met een klassiek cyclotron, bij een nog niet onredelijk klein rendement, deuteronen ook wel tot 25 MeV kan versnellen (zie A). Bij het synchrocyclotron is hiervoor echter een veel geringer oscillatorvermogen nodig en wordt de constructie ook in andere opzichten zeer veel eenvoudiger dan bij een klassiek cyclotron. Dit zal dadelijk blijken in het volgende artikel van deze serie.

Keren wij nog even terug tot fig. 1. De hoogfrequente trilling wordt op de Dee's en op de modulator gebracht door een coaxiaal Lechersysteem, *9* en *10*. Als zodanig moeten we inderdaad de verbindingsleiding opvatten, want bij de gebezigde frequentie (golflengte ongeveer 30 m) en de grote afmetingen van de onderdelen, om te beginnen van de versnellingskamer, kan men het systeem niet meer als quasistationnair beschouwen. Dat het gehele systeem niet in een rechte lijn, doch met een knik in het midden is opgesteld, heeft geen diepere reden dan dat men voor onderhoudswerkzaamheden het gedeelte *9* van het Lechersysteem met de Dee *3* gemakkelijk uit de installatie wil kunnen halen. Het stuk *9* is daartoe gemonteerd op een onderstel met wielen die op radiaal tot de magneet gerichte rails lopen. Na verwijderen van het gedeelte *7* der oscillatorschakeling kunnen *9* en *3* naar buiten worden gereden, zonder dat het gedeelte *10* van het Lechersysteem en de modulator van hun plaats moeten.

Verder is in fig. 1 te zien dat er twee vacuumpompen met hun voorpompen aanwezig zijn, de ene (*11*) aangesloten op de versnellingskamer, de andere (*12*) op de modulator. Waarom niet met één

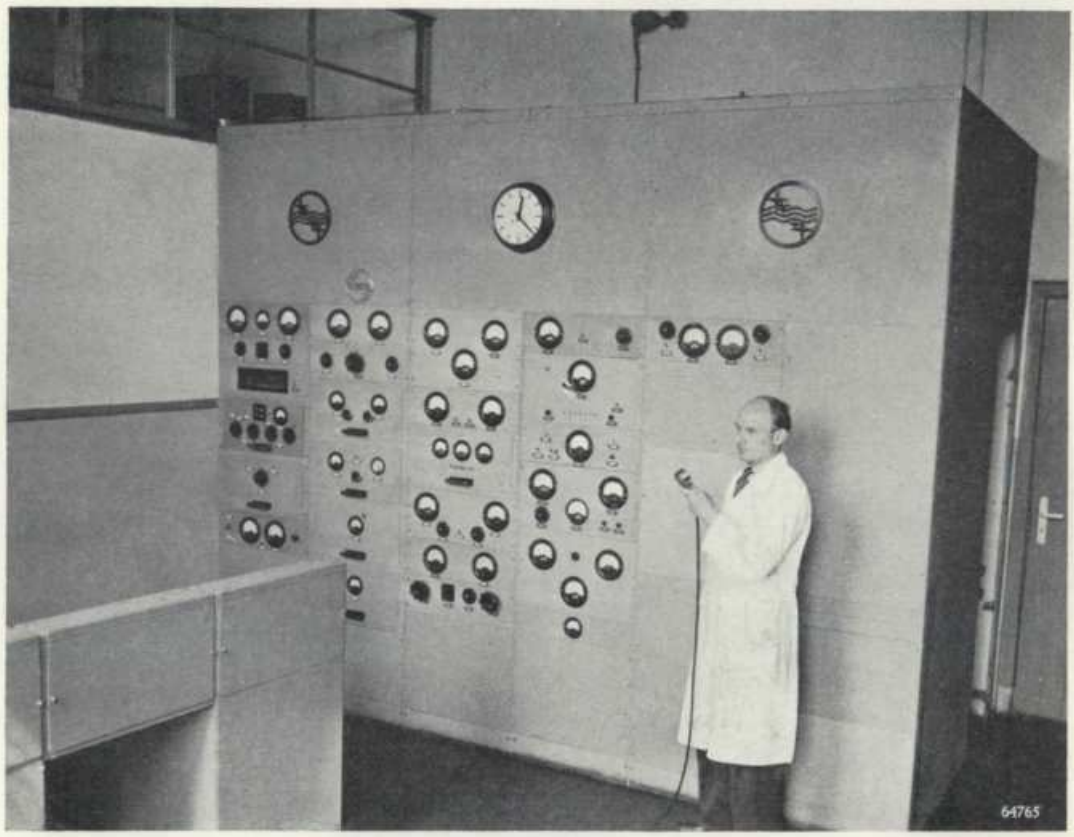


Fig. 3. Gedeelte van de contrôle- en bedieningskamer van het synchrocyclotron te Amsterdam. Het personeel in deze kamer is door een laag water ter dikte van 3,5 m beschermd tegen de straling die van de versnellingsapparatuur uitgaat.

[4]) T. G. Pickavance, J. B. Adams en M. Snowdon, The Harwell cyclotron, Nature **165**, 90-91, 21 Januari 1950.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vacuumapparatuur kan worden volstaan, zal uit het vervolg blijken.

Ten slotte bevat de installatie van het synchrocyclotron nog allerlei, ten dele zeer omvangrijke onderdelen, die overeenkomen met wat bij een radiozender nodig is en die in fig. 1 en 2 niet zijn te zien. Zo bijv. een gelijkrichtinstallatie, die de gelijkspanning van 12 kV voor de buizen van de oscillator levert; een trommel met 2×10 meter rubberslang, waarin het potentiaalverschil van het uit de waterleiding komende koelwater en de op hoogspanning staande gekoelde anode wordt

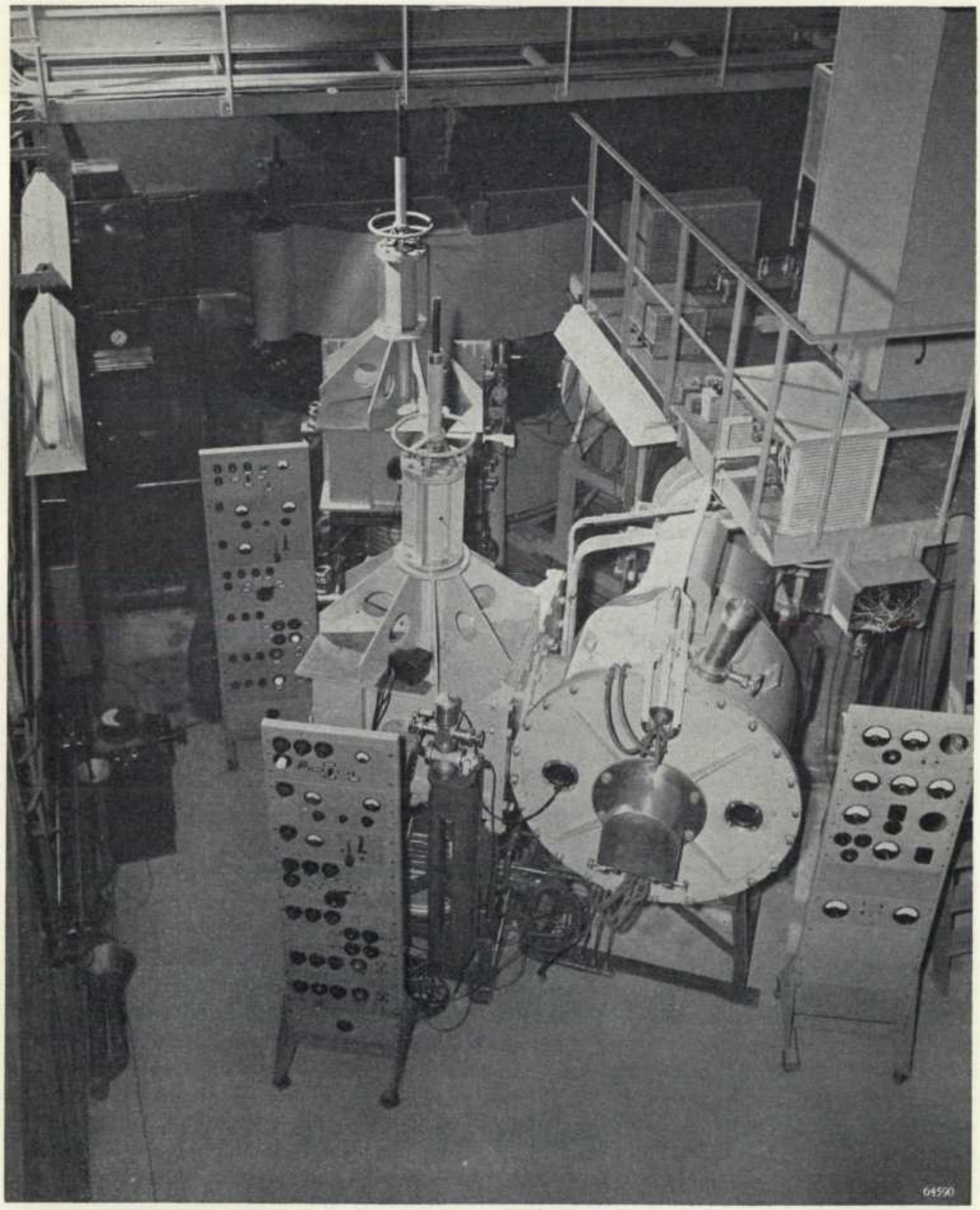


Fig. 4. Het synchrocyclotron, gezien in de richting van de pijl in fig. 1*b*. Op de voorgrond rechts de modulator.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

opgenomen; een contrôle- en bedieningskamer, met een groot aantal bedieningsorganen en meetinstrumenten (*fig. 3*). Deze kamer is van het cyclotron gescheiden door een watertank ter dikte van 3,5 m, die het personeel beschermt tegen de in de versnellingskamer (in vangschijf en wanden) opgewekte neutronenstraling en gammastraling. Naar de andere zijden is het cyclotron door beton van 1 m dikte afgeschermd. Ook als de ruimte van het cyclotron, na onderbreking van het bedrijf, wordt betreden om de producten van de transmutaties te „oogsten", dwz. de vangschijf met de hierop aangebrachte stoffen uit de versnellingskamer te halen, worden natuurlijk de nodige voorzorgsmaatregelen genomen. De vangschijf wordt vastgehouden aan een 1,25 m lange houder. Elke houder laat men na een bestraling eerst enige tijd (naar gelang van de levensduur en de concentratie der gevormde radioactieve isotopen) „afkoelen" tussen betonnen blokken alvorens hij opnieuw wordt gebruikt.

De stoffen worden gewoonlijk bestraald tot er een radioactiviteit in is opgewekt van de orde van enige tientallen millicurie [5]). De neutronenstraling die van de vangschijf (en andere onderdelen) uitgaat, wordt doorlopend gemeten met een boriumionisatiekamer [6]), die op een vaste plaats vlak bij de versnellingskamer is opgesteld (*13* in fig. 1).

De foto *fig. 4* geeft nog een kijk op het cyclotron, gezien in de richting van de pijl in fig. 1*b*. Deze opname, tezamen met fig. 3, geeft tevens enigszins een indruk van de uitgebreidheid der benodigde hulpapparatuur. Op de voorgrond rechts zien we de modulator, die in het nu volgende artikel uitvoerig zal worden besproken.

---

[5]) Bij phosphorus bijv. verkrijgt men een activiteit van 150 microcurie per μAh, dus onze bundel van 20 μA brengt in dit geval 3 millicurie per uur op. De onvermijdelijke verliezen aan radioactieve phosphorus bij de chemische bewerking, die nodig is vóór de aflevering aan de „klant", zijn in deze opbrengst reeds verrekend. (De gedurende de chemische bewerking al optredende terugval van de activiteit kan worden verwaarloosd, want de halveringstijd van deze atoomsoort is ca 14 dagen.)

[6]) Deze bevat een vaste of gasvormige boriumverbinding, waaruit door neutronen α-deeltjes worden vrijgemaakt. De gemiddelde ionisatiestroom die de α-deeltjes veroorzaken wordt gemeten.

II. DE OSCILLATOR EN DE MODULATOR

Grondslagen voor de constructie van de oscillator

Dank zij de fazestabilisatie, die de rondcirkelende deeltjes in het synchrocyclotron ondervinden, kan men deze een groot aantal malen laten rondlopen zonder gevaar dat er te veel van verloren gaan. Men kan derhalve, voor een bepaalde gewenste eindenergie, met een kleine energiewinst per omloop volstaan. Dit is de reden waarom de wisselspanning tussen de Dee's bij een synchrocyclotron van de door ons gekozen afmetingen niet groter dan bijv. 15 kV_{top} behoeft te worden gemaakt, terwijl voor een klassiek cyclotron van dezelfde afmetingen een spanning van zeker 100 kV_{top} tussen de Dee's nodig zou zijn.

Ook nog veel kleinere waarden dan 15 kV_{top} zijn heel goed mogelijk, doch zij hebben het bezwaar dat dan de toelaatbare modulatiefrequentie en daarmee de bereikbare bundelstroomsterkte eveneens veel kleiner worden. We komen hierop terug.

Aan de zoveel lagere spanning zitten twee zeer belangrijke voordelen vast. Ten eerste wordt hierdoor het gevaar van doorslag langs isolatoren en door het gas in de versnellingskamer veel kleiner. Van dit voordeel kan men op verschillende wijzen profijt trekken. Men kan, zelfs bij een verhoogde bedrijfszekerheid, een grotere gasdruk in de versnellingskamer toelaten, waardoor het mogelijk wordt grotere ionenconcentraties en derhalve grotere bundelstroomsterkten te verkrijgen. Verder kan men een van de beide Dee's aan aarde verbinden (zodat dus de volle in plaats van de halve Dee-spanning tussen de andere Dee en de geaarde kamerwanden komt te staan); dit vergemakkelijkt in hoge mate het aanbrengen van ionenbron, vangschijf, enz.

Het tweede voordeel van de lagere Dee-spanning is, dat men met een aanzienlijk kleiner hoogfrequent vermogen uitkomt dan bij het klassieke cyclotron. Heeft het Dee-circuit een kwaliteitsfactor Q en een capaciteit C (we denken het even door een L-C-kring vervangen), dan is een vermogen

$$P = \frac{\omega C V^2}{2Q} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

nodig om hierin een trilling te onderhouden met een topspanning V en hoekfrequentie ω. (De in A ingevoerde index E bij ω laten we nu maar weg.) De capaciteit C wordt vooral door constructieve eisen bepaald; zij kon in ons geval niet kleiner worden

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gemaakt dan 400 pF. De kwaliteitsfactor Q kon door zorgvuldige bouw worden opgevoerd tot 1500. Met $\omega = 2\pi \cdot 10{,}7 \cdot 10^6$ en $V = 14$ kV volgt hieruit $P \approx 1{,}6$ kW voor het Dee-circuit. Het modulatorcircuit neemt nog eens eenzelfde vermogen op, zodat het voor ons synchrocyclotron benodigde hoogfrequent vermogen in totaal ruim 3 kW bedraagt. Voor een klassiek cyclotron van dezelfde afmetingen zou het benodigde hoogfrequent vermogen ca 100 kW zijn.

In *fig. 1* is, heel schematisch, het hoogfrequent trillingsysteem getekend. We kunnen het opvatten als een Lechersysteem met twee grote geconcentreerde capaciteiten aan de einden: de (niet-geaarde) Dee in de versnellingskamer aan het ene eind, met de capaciteit $C_1 = 400$ pF, en een in eerste instantie even grote capaciteit C_2 (de modulator M) aan het andere eind. Met behulp van een oscillatorschakeling wordt het Lechersysteem in trilling gebracht zodanig, dat er een staande golf op ontstaat, met aan elk einde een spanningsbuik en in het midden een spanningsknoop (zie de figuur).

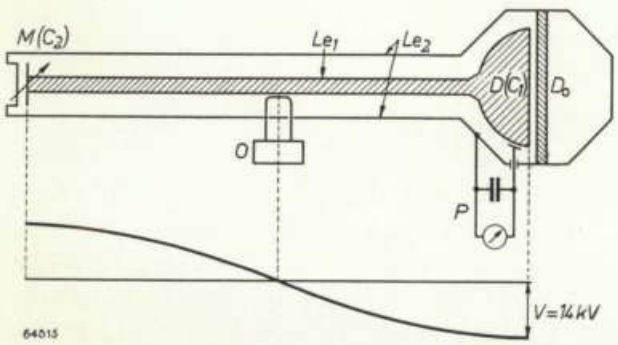


Fig. 1. Het hoogfrequent trillingsysteem van het synchrocyclotron, sterk geschematiseerd. Le_1, Le_2 coaxiaal Lechersysteem, D Dee, M modulator, O oscillatorbuis met koppellus. Daar de andere Dee (D_0) is geaard, kan hij in principe worden gedacht als een smalle, met de wanden van de versnellingskamer verbonden strip, geplaatst tegenover de rand van de op hoogspanning komende Dee. Als we in het vervolg over „de Dee" spreken, bedoelen we steeds de niet-geaarde. P is een inrichting om de Dee-spanning te meten. Onder in de figuur is de spanningsverdeling langs het systeem aangegeven.

Het systeem vormt dus een $\lambda/2$-leiding. Dank zij de invloed der geconcentreerde capaciteiten behoeft het systeem echter niet 15 m lang te zijn, zoals aan de golflengte van 30 m zou beantwoorden, doch slechts ca 7 m. Door periodiek variëren van de capaciteit C_2 van de modulator bereikt men dat de frequentie periodiek tussen ca 10,7 en 10,3 MHz heen en weer gaat (variatie van 4%, zie I).

De Lecherleiding is ter beperking van stralingsverliezen uitgevoerd in de vorm van twee coaxiale geleiders, de binnenste met een diameter van ongeveer 15 cm (natuurlijk wordt deze binnengeleider zelf als holle pijp uitgevoerd, aangezien de hoogfrequente stromen toch alleen aan de oppervlakte lopen), de buitenste met een diameter van (gemiddeld) 60 cm. De eigenaardige configuratie van het systeem maakte het onmogelijk de nodige dimensies voor de gewenste frequentie van 10,7 MHz van te voren precies te berekenen. De dimensies van de leiding en van de modulator (die van de Dee liggen vast door andere overwegingen, nl. het vermijden van doorslag en het zoveel mogelijk ruimte bieden voor verticale uitwijkingen van de rondlopende deeltjes) werden derhalve vastgesteld met behulp van modelproeven. Hiertoe werd een ruw model op ware grootte vervaardigd, waaraan gemakkelijk wijzigingen konden worden aangebracht, en waarvan na elke wijziging de resonantiefrequentie werd bepaald. De laatste vorm van het model leverde het voorbeeld voor de werkelijke uitvoering, die natuurlijk van het model verschilt door de zorgvuldige afwerking: alle onderdelen zijn van koper gemaakt, nauwkeurig passend en gesoldeerd met zilver, zodat de verliesweerstand van het gehele systeem slechts ongeveer 0,05 ohm bedraagt. Aldus werd de waarde 1500 van de kwaliteitsfactor verkregen.

Dat het essentieel is de verliesweerstand zo klein te houden, wordt duidelijk uit een berekening van de stroomsterkten die in het systeem optreden: om de capaciteit $C_1 = 400$ pF tot een topspanning van $V = 14\,000$ V te laden met een frequentie $\omega = 2\pi \cdot 10^7$, is een stroom nodig met de topwaarde

$$I = \omega C_1 V,$$

d.i. dus rond 350 ampère. Met de genoemde kleine totale verliesweerstand volgt hieruit het, eveneens reeds genoemde, totale gedissipeerde vermogen van ruim 3 kW. Aangezien de stroom van deeltjes op de vangschijf ca 560 watt ontwikkelt (deze waarde zal door verbetering van de ionenbron misschien nog verder kunnen worden opgevoerd), kunnen we zeggen dat ca 15% van het hoogfrequent vermogen nuttig wordt gebruikt — een merkwaardig hoog „rendement" voor een cyclotron.

Het principeschema van de oscillator is in *fig. 2* weergegeven. Toegepast is een zg. Meissner-schakeling, dwz. de anodekring van de zendbuis B is inductief gekoppeld met het trillingsysteem (dat hier eenvoudig als L-C-kring is aangegeven), en ook de terugkoppeling op de roosterkring (excitatie) is inductief. De anode- en de roosterkoppelspoel bestaan ieder slechts uit één lus, die naast de binnengeleider van het Lechersysteem wordt geplaatst zodanig dat de magnetische krachtlijnen van de lus de geleider mee omvatten en vice versa.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De Meissner-schakeling moest worden gekozen omdat het niet mogelijk is de binnengeleider van het Lechersysteem ter plaatse van de koppeling aan een onderdeel te verbinden dat een gedefinieerde (hoogfrequente) spanning moet hebben. Weliswaar

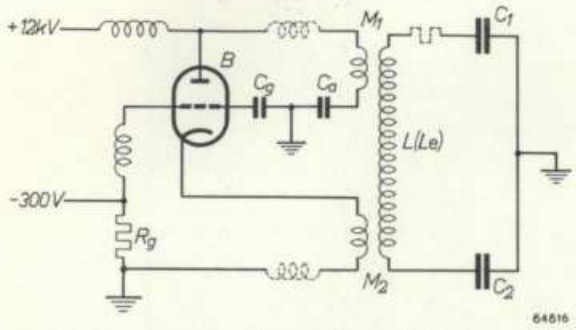


Fig. 2. Principeschema van de oscillator. Het trillingsysteem van het cyclotron is op te vatten als een L-C-kring, met de zelfinductie voornamelijk geconcentreerd in de Lecherleiding (Le), de capaciteit voornamelijk in de Dee (C_1) en in de modulator (C_2). Deze kring is inductief gekoppeld met de anode- en de roosterkring van de zendbuis B (Meissner-schakeling). Niet gewenste, maar onvermijdelijke impedanties zijn gestippeld aangegeven.

ontstaat op deze plaats, in het midden van het Lechersysteem, een spanningsknoop (vgl. fig. 1), maar ten gevolge van de periodieke variatie van de capaciteit C_2 van de modulator ligt de plaats van de knoop niet geheel vast doch schuift ze een weinig langs de Lecherleiding heen en weer. Bij de inductieve koppelingen volgens fig. 2 ondervindt men hiervan geen last.

Voor het vermijden van parasitaire oscillaties, met frequenties die niet door het Lechersysteem maar door andere in de schakeling voorkomende L-C-ketens worden bepaald, is het nodig elke directe koppeling tussen anode- en roosterkring rigoureus te vermijden. Hiertoe is, door een geschikte vormgeving van de anode- en roosterkoppellussen, de inductieve koppeling tussen deze beide lussen zo zwak mogelijk gemaakt (zie de volgende paragraaf). Verder is ook een capacitieve koppeling via de buis zoveel mogelijk vermeden, door het rooster hiervan grondig hoogfrequent te aarden met de grote capaciteit C_g (waarbij hoegenaamd alle zelfinductie vermeden is). De excitatiespanning wordt dus op de kathode gebracht, en we kunnen beter spreken van „kathodekoppellus." De vereiste roostervoorspanning wordt geleverd door een voedingsapparaat met een beveiligingsinrichting: zodra het genereren in de juiste frequentie ophoudt, wordt onmiddellijk het rooster zoveel sterker negatief dat de buis geheel wordt afgeknepen.

Opdat de schakeling kan oscilleren, moet voldaan zijn aan een voorwaarde die in eerste benadering luidt:

$$(M_1 - M_2)\, M_2 \geqq \frac{r}{\omega^2 S}, \quad \ldots \quad (2)$$

waarbij M_1 en M_2 de coëfficienten van wederzijdse inductie tussen de koppellussen en de Lecherleiding zijn (fig. 2), r de reeds genoemde kringweerstand, S de steilheid van de buis. Aangezien ω vastligt en wij r niet willekeurig klein, S niet willekeurig groot kunnen maken, was het zaak $(M_1-M_2)M_2$ de grootst mogelijke waarde te geven. Hiertoe moet M_1 zo groot mogelijk worden gemaakt en $M_2 = \frac{1}{2}M_1$, waarvoor dan ook is gezorgd. Daar echter M_1 en M_2 slechts bij benadering vooruit konden worden berekend, was het ook hier weer nodig door modelproeven, schaal 1 : 1, na te gaan of $(M_1-M_2)M_2$ groot genoeg zou zijn. Bij gebruik van twee parallelgeschakelde zendbuizen TA 12/20 bleek een steilheid te worden verkregen, groot genoeg om ruimschoots aan de oscillatievoorwaarde te kunnen voldoen.

Uitvoering van de oscillator

In *fig. 3* is een iets volledige en meer realistische, geometrisch echter nog niet geheel exacte voorstelling van de oscillator gegeven. De beide parallelgeschakelde, watergekoelde, zendbuizen (hier is weer slechts één buis getekend) staan in een geaard metalen huis dat door een horizontaal schot ter hoogte van de roosters in twee geheel gescheiden delen, de anoderuimte en de kathoderuimte, is verdeeld. De anodekoppellus, een tweemaal rechthoekig gebogen, holle, koperen geleider is zijdelings uit het

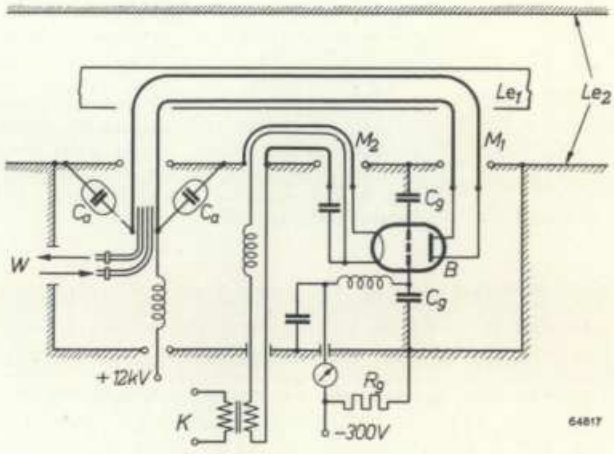


Fig. 3. Nader uitgewerkte schakeling van de oscillator met de anodekoppellus M_1 en de kathodekoppellus M_2. Voor B worden twee parallelgeschakelde zendbuizen TA 12/20 gebruikt. C_g condensatoren waarmee het rooster van elke buis hoogfrequent is geaard, C_a condensatoren voor de hoogfrequente aarding van de anodelus, R_g roosterweerstand, K voeding van de kathoden, W koelwater voor de anoden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

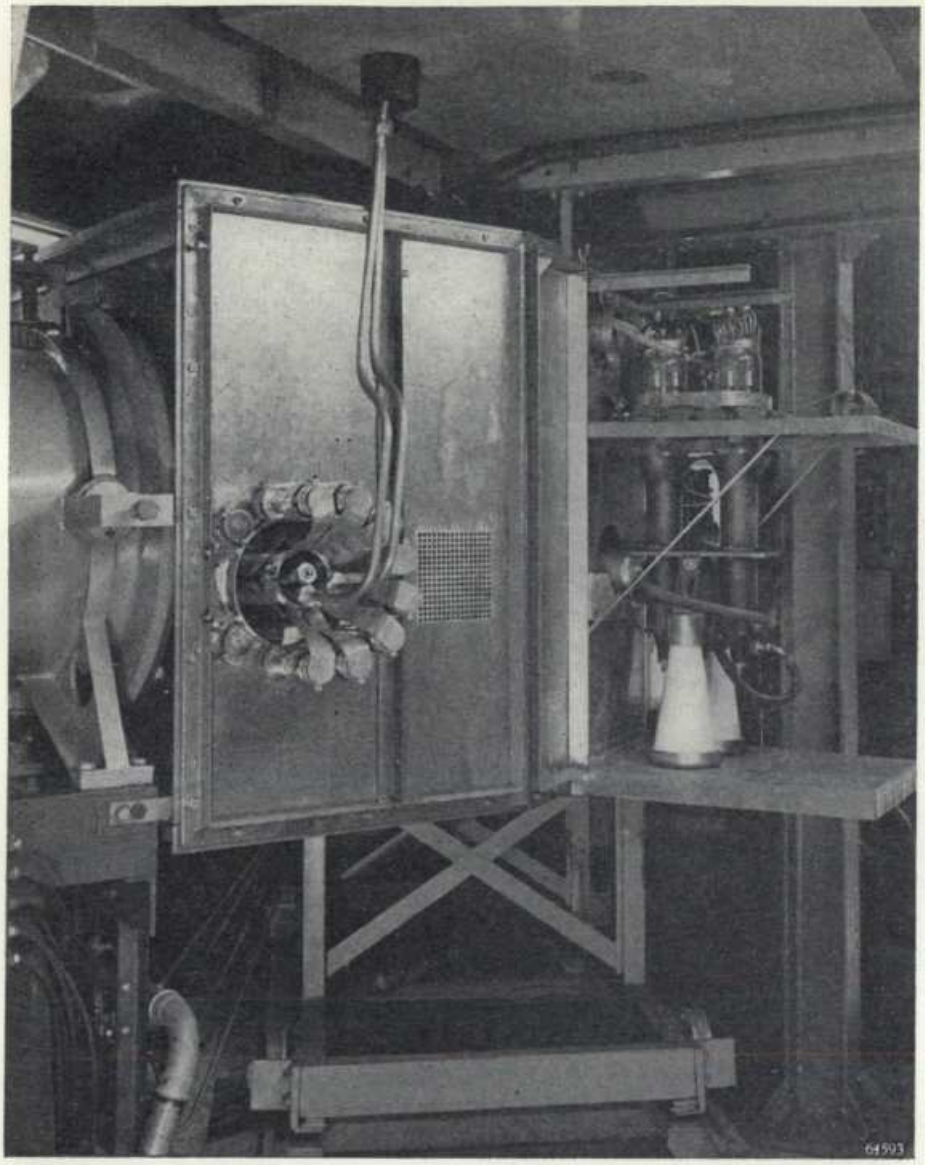


Fig. 4. Het centrale gedeelte van de oscillatorschakeling, geopend. Men ziet de beide zendbuizen, met de anoden naar onderen. De beide slangen voeren hier het koelwater toe en af, zij lopen door de holle anodekoppellus, die men, links van de buizen, door de wand ziet treden. Nog verder links ziet men het einde van de anodekoppellus, door een krans van vacuumcondensatoren aan het geaarde huis verbonden. De verbinding is bewerkstelligd door brede strippen om de zelfinductie klein te houden. Men ziet hier ook weer duidelijk de aansluiting op de (naar boven verdwijnende) waterleidingbuizen. De oscillator is gemonteerd op het onderstel dat ook de helft van het coaxiale Lechersysteem met de Dee draagt en dat op rails naar buiten kan worden gereden voor eventuele onderhoudswerkzaamheden.

huis gevoerd (op de foto *fig. 4* is hier nog juist iets van te zien) en loopt dan gedeeltelijk in een uitholling van de binnengeleider van het Lechersysteem. Op deze wijze wordt de gewenste sterke koppeling (M_1) verkregen; immers, vrijwel alle magnetische krachtlijnen die de ene geleider omvatten, omvatten nu in dit gedeelte van de lus ook de andere, en bovendien is de lengte dezer krachtlijnen zo klein mogelijk gemaakt. Aan het vrije einde is de anodelus hoogfrequent geaard door middel van een rondom de geleider aangebrachte krans van vacuumcondensatoren (C_a in fig. 2 en 3), die practisch geen zelfinductie introduceren, een zeer geringe verlieshoek hebben en een voldoende doorslagvastheid bezitten om de anodegelijkspanning van 12 kV uit te houden; zij zijn in fig. 4 links te zien. Op dit punt wordt, door isolerende slangen in de holle geleider van de lus, het koelwater voor de anoden toe- en afgevoerd.

De kathodekoppellus, een koperen pijp, wat korter en dunner dan de anodekoppellus, is bovenaan uit het geaarde huis gevoerd en van boven

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

naar de binnengeleider toegebracht. Dit kon in fig. 3 niet getekend worden, doch wordt nader geïllustreerd door de schets *fig. 5* en is ten dele op de foto *fig. 6* te zien. Door deze maatregel is de koppeling tussen anode- en kathodekoppellus klein gehouden. Hiertoe zijn ook de benen van de lussen, die niet bijdragen tot de koppeling met het Lechersysteem maar wel tot de onderlinge koppeling, zo kort mogelijk gemaakt. Het werkzame gedeelte van de kathodelus is ongeveer half zo lang als dat van de anodelus, overeenkomstig de voorwaarde $M_2 = \frac{1}{2}M_1$. Het vrije, weer naar boven gevoerde einde van de kathodelus is geaard, hier wordt door de holle geleider van de lus de gloeispanning voor de kathode toegevoerd.

Het rooster van elke zendbuis is geaard door een krans van condensatoren (C_g in fig. 2 en 3). Wegens de geringere eisen wat betreft de doorslagvastheid konden hier eenvoudige mica-condensatoren worden gebruikt.

Hoewel, zoals vermeld, ruimschoots aan de oscillatievoorwaarde werd voldaan, werden aanvankelijk toch moeilijkheden ondervonden bij het starten van de oscillator. Deze moeilijkheden bleken hun oorzaak daarin te vinden dat de trillingskring extra belast wordt door ontladingstromen die in de versnellingsruimte van de Dee naar aarde lopen, en door electronen uit de ionenbron die de Dee bereiken. Door een negatieve gelijkspanning van enige honderden volt aan de Dee te leggen, welke spanning via een smoorspoel aan de binnengeleider van het Lechersysteem wordt toegevoerd (de smoorspoel is in fig. 6 in het midden te zien), werd de extra belasting voldoende verminderd om het systeem gemakkelijk aan het oscilleren te brengen.

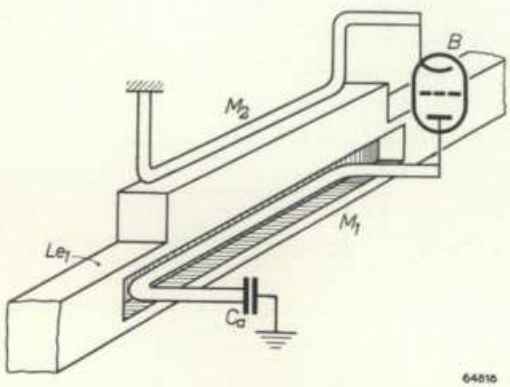


Fig. 5. Configuratie van de anodekoppellus (M_1) en de kathodekoppellus (M_2). De binnengeleider Le_1 van het coaxiale Lechersysteem heeft een uitholling, waarin de anodekoppellus is gelegd, en een verhevenheid, waar de kathodekoppellus van boven dicht bij is gebracht. De directe koppeling tussen de beide lussen is bij deze configuratie zo klein mogelijk.

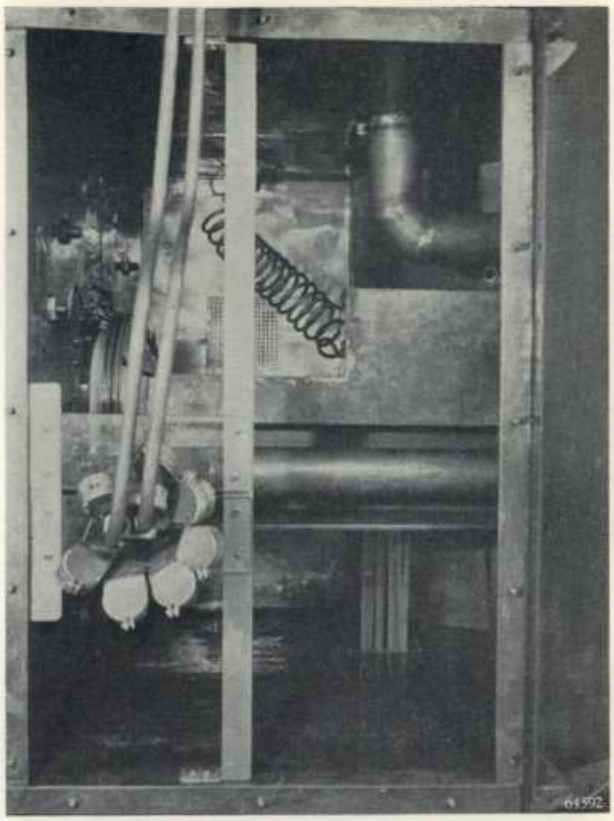


Fig. 6. Kijkje in het middenstuk van het coaxiale Lechersysteem, waar men een gedeelte van de anodekoppellus (onder) en van de kathodekoppellus (rechts boven) ziet. Links vooraan het einde van de anodekoppellus, met aansluitingen voor de krans van aardingscondensatoren en met waterleidingbuizen.

Het bleek nu mogelijk een wisselspanning tot 25 kV_{top} op de Dee op te wekken, zonder dat enige last werd ondervonden van doorslagen in het gas, oververhitting van onderdelen, of overbelasting van de buizen. Reeds met 5 kV_{top} echter bleek het apparaat bevredigend te werken, dwz. een behoorlijke bundel deuteronen van 28 MeV te leveren. Bij de normale bedrijfspanning op de Dee, van 14 kV_{top}, maten wij een ingangsvermogen van de beide buizen van 5,7 kW en een anodedissipatie van 2,2 kW, zodat het hoogfrequente uitgangsvermogen 3,5 kW, het rendement der buizen 61% bedraagt. De uit dit vermogen en de gegeven waarden van V, ω, en C te berekenen waarde van de kwaliteitsfactor Q (zie verg. 1)) klopt goed met de waarde die uit de breedte van de resonantiekromme van het trillingsysteem werd bepaald. De spanning op de Dee wordt gemeten door middel van een diodevoltmeter en een capacitieve spanningsdeler (P in fig. 1).

De modulator

Er is reeds vermeld dat de vereiste periodieke variatie van de oscillatiefrequentie met 4% wordt bewerkstelligd door een variatie van de capaciteit

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

C_2 (fig. 1). Aangezien bij benadering alle capaciteit van het trillende systeem geconcentreerd is in C_1 en C_2, is de totale kringcapaciteit:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Hieruit volgt, daar in ons geval $C_2 = C_1$ is genomen:

$$\frac{\Delta C}{C} = \tfrac{1}{2}\frac{\Delta C_2}{C_2},$$

en daar verder geldt:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = -\tfrac{1}{2}\frac{\Delta C}{C},$$

vinden wij voor de vereiste relatieve variatie van C_2:

$$\frac{\Delta C_2}{C_2} = -4\frac{\Delta\omega}{\omega}.$$

Om ω 4% te doen dalen, moeten we dus C_2 met 16% doen toenemen, d.i. met 64 pF in het geval $C_2 = 400$ pF.

Deze capaciteitsvariatie wordt verkregen met behulp van een condensator, bestaande uit een van tanden voorziene schijf die tussen twee vaste kammen draait, zie *fig. 7*. Staan de tanden van de schijf juist tegenover die van de kammen, dan is de capaciteit maximaal, staan de tanden van de schijf juist tegenover de tussenruimten van de kammen, dan is de capaciteit minimaal. De draaiende schijf heeft 40 tanden en maakt 50 omwentelingen per seconde, de modulatiefrequentie van de Dee-spanning is dus 2000 Hz. Parallel aan deze condensator is een tweede geschakeld, met een constante capaciteit, zodanig dat de totale capaciteit in de minimumstand van de draaiende condensator bij benadering de gewenste waarde $C_2 = 400$ pF verkrijgt. Deze constante capaciteit kan tijdens het bedrijf met behulp van een servomotortje nog een weinig worden bijgeregeld, om exacte resonantie tussen de trillingsfrequentie van het systeem en de rondlopende deeltjes in de versnellingskamer te bereiken. Het bereiken van resonantie kan worden geconstateerd door het optreden van een maximum in de stroomsterkte naar de vangschijf, of in de neutronenconcentratie rondom de versnellingskamer.

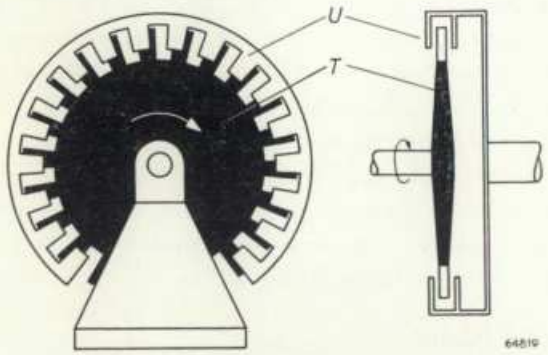


Fig. 7. De modulator bevat een periodiek variërende capaciteit, gerealiseerd door een schijf met tanden T die tussen twee vaste kammen U draait. Het verschil tussen grootste en kleinste capaciteit is 64 pF.

De variabele en de constante condensator zijn in een geëvacueerde ketel geplaatst (10^{-5} mm Hg). Dit maakte het mogelijk de afstanden tussen de draaiende en de vaste condensatorgedeelten, ondanks de hoge spanningen die hierop komen te staan, relatief klein te kiezen (6 mm) en derhalve de vereiste grote capaciteitswaarden reeds met een betrekkelijk klein plaatoppervlak te realiseren. Op deze wijze kon de modulator klein genoeg worden gehouden om met het grote toerental van 3000 omw/min te kunnen werken, en zodoende kon dus de eerder vermelde hoge modulatiefrequentie van 2000 Hz worden verkregen [1]).

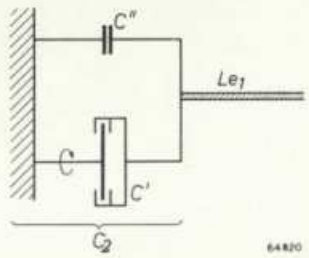


Fig. 8. Schakeling van de modulator. Parallel aan de periodiek variërende condensator C' is een constante condensator C'' geschakeld om de gewenste totale capaciteit te verkrijgen. De draaiende schijf van C' moet worden geaard.

Beschouwen we nog even de principeschakeling, *fig. 8*, dan zien we dat de ene plaat van de constante condensator (C'') en de vaste kammen van de variërende condensator (C') verbonden worden aan de binnengeleider van het Lechersysteem. De andere condensatorplaat resp. de draaiende getande schijf moeten worden geaard. Wat de draaiende schijf betreft, zou dit in principe mogelijk zijn met een sleepcontact (borstels). Deze oplossing bleek echter wegens de te hoge weerstand der borstels voor hoogfrequente stromen en wegens de boogvorming bij het vonken in vacuum niet goed te voldoen. De aarding wordt derhalve

[1]) Van belang is hierbij dat slechts een capaciteitsvariatie van 64 pF nodig is. Moet de frequentiezwaai veel groter zijn dan 4% (dus voor een grotere eindenergie der deeltjes, en voor protonen in plaats van deuteronen, zie I), dan vervalt men in roterende condensatoren van veel grotere capaciteit, waarbij het minder gemakkelijk wordt hoge modulatiefrequenties te bereiken.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

bewerkstelligd met een grote condensator, bestaande uit een aantal vaste, geaarde platen en een aantal hiertussen (met 2 mm tussenruimte) roterende platen die op de as van de draaiende condensatorschijf C' zijn bevestigd en hiermee electrisch verbonden. Weliswaar is de aarding van C' hierbij

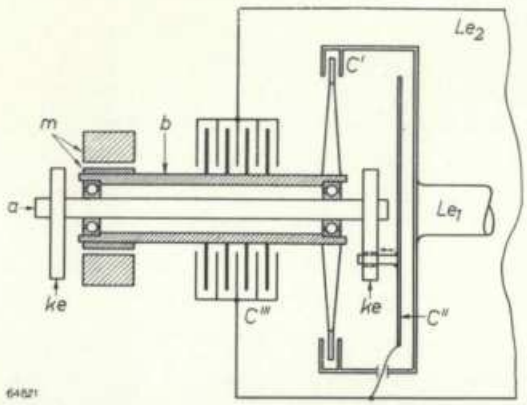


Fig. 9. Constructie van de modulator, met de draaiende condensator C', de vaste (instelbare) condensator C'' en de aardingscondensator C''' (schematisch). Le_1 en Le_2 binnen- en buitengeleider van het Lechersysteem; b bus die de draaiende condensatorgedeelten draagt en die om de vaste, met twee stellen „Kersima" blokjes ke geïsoleerd opgestelde as a draait; op b is tevens het kortsluitanker (een ijzeren bus) van de motor m bevestigd.

niet volledig; immers, de in serie staande capaciteiten van C' en van de aardingscondensator vormen een spanningsdeler, zodat de draaiende schijf, evenals de draaiende platen van de aardingscondensator, nog op een geringe hoogfrequente spanning, van ca 0,5 kV, blijven staan. De hierdoor vereiste isolatie van het draaiende gedeelte van de modulator is constructief verwezenlijkt op de wijze die in *fig. 9* is weergegeven. De schijf en de platen zijn gemonteerd op een bus, die met twee kogellagers kan draaien om een vaste, met water gekoelde as, die met behulp van blokjes keramisch isolatiemateriaal („Kersima") geïsoleerd is opgesteld. De opstelling is zo gemaakt dat de capaciteit tussen de as en aarde gering is, om te vermijden dat noemenswaardige hoogfrequente stromen over de kogellagers vloeien. Deze stromen konden nog verder worden verminderd door, op de bekende wijze, de capaciteit door een parallelgeschakelde spoel tot een op 10,7 MHz afgestemde kring aan te vullen, die dus voor die frequentie een maximale impedantie heeft.

Het draaiende gedeelte van de modulator wordt aangedreven door middel van een motor, die zelf ook in het vacuum is geplaatst. Het was wel mogelijk geweest de modulator van buiten de vacuumketel aan te drijven, maar hiertoe had door de wand van de ketel heen een as moeten worden gevoerd die continu met 3000 omw/min draait, terwijl de doorvoering een vacuum van 10^{-5} mm Hg afgesloten moet houden. Een bedrijfszekere uitvoering hiervan is niet gemakkelijk te realiseren. De door ons gekozen oplossing daarentegen is zeer simpel. Alleen de voedingsleidingen voor de driefazenspanning van de motor behoeven door de ketelwand naar binnen te worden gevoerd. De motor bevat een kortsluitanker in de vorm van een ijzeren bus, die geschoven is op de reeds vermelde bus welke de draaiende modulatorgedeelten draagt. De met drie wikkelingen bekrachtigde stator, die het draaiveld levert, is om de bus heen geplaatst met een spleet van enkele mm. Essentieel is, dat de motor in vacuum niet te veel gas of verontreinigingen mag afgeven. Met bekrachtigingspoelen van geïsoleerd draad is het zeer moeilijk aan deze eis te voldoen. We hebben daarom de motor geconstrueerd voor een zeer grote stroom (elk der 3 fazen 185 A, spanning 2,1 V; de aanloopstroom is 300 A) en een zeer gering aantal bekrachtigingswindingen. Hierdoor konden deze windingen worden uitgevoerd als vrijstaande, blanke, koperen buizen, waar koelwater door stroomt, en die op twee hardpapieren platen (het enige isolatiemateriaal dat de motor bevat) zijn gemonteerd. Op de foto *fig. 10* zijn dit en andere details van de constructie te zien.

Aangezien de motor slechts een klein koppel heeft en het systeem toch snel moet aanlopen om

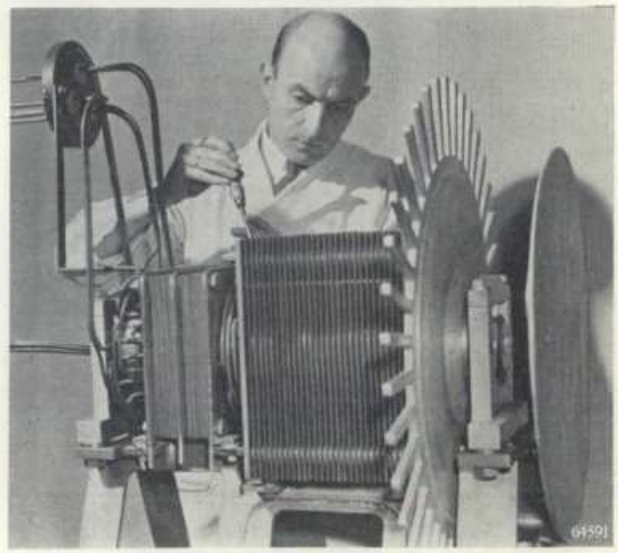


Fig. 10. De modulator (zonder de aan het Lechersysteem vastzittende gedeelten van de condensatoren C' en C'', zie fig. 9). Van rechts naar links ziet men: de een weinig verschuifbare plaat van C'' (geleid door drie pennen), de getande schijf van C', de grote aardingscondensator C''', en de stator van de aandrijvende motor, met de eigenaardige, uit vrijstaande koperen waterleidingbuizen geconstrueerde „wikkelingen" voor de drie fazen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zonder moeite enkele kritische toerentallen te passeren, is het systeem zeer zorgvuldig gelagerd. De wrijving is zo gering dat de uitlooptijd ruim een uur bedraagt (er is geen luchtweerstand). De lagers kunnen tijdens het bedrijf van buiten af gesmeerd worden, met speciale vacuumolie, maar het is gebleken dat dit practisch niet nodig is.

We hebben er reeds op gewezen dat de dimensionnering der onderdelen, ook van de modulator, met modelproeven moest worden bepaald om de juiste frequentie te krijgen. Het blijkens metingen verkregen resultaat is, dat de frequentie zwaait tussen 10,46 en 10,11 MHz. Dit is een variatie van iets minder dan 4%, doch deze is reeds ruim voldoende. Uit de resonantievoorwaarde $\omega = qB/m$ volgt, dat bij de maximumfrequentie resonantie optreedt indien $B = 1{,}36$ Wb/m². De werkelijke inductie in het midden van de versnellingskamer is een weinig groter, resonantie wordt dus pas bereikt als de frequentie reeds iets gedaald is. Gedurende een periode van de modulatiefrequentie heeft de versnelling derhalve plaats ongeveer tussen de tijdstippen M en N in *fig. 11*, d.i. gedurende iets minder dan de helft van $^1/_{2000}$ sec, dus ongeveer $^1/_{5000}$ sec.

De vorm van het frequentieverloop, die verband houdt met de gekozen vorm van de tanden van de roterende condensator, is niet kritisch, dank zij de fazestabiliteit van de rondlopende deeltjes.

Er dient hier nog een opmerking te worden gemaakt over de modulatiefrequentie. We hebben er op gewezen dat de hoge waarde van 2000 Hz gunstig is voor het verkrijgen van een grote gemiddelde bundelstroomsterkte op de vangschijf. De vraag ligt voor de hand, of het zin heeft naar een nog hogere modulatiefrequentie te streven.

De deuteronen in ons synchrocyclotron hebben een omloopsnelheid van globaal 10^7 omlopen per seconde (nl. ongeveer gelijk aan de frequentie 10,7 MHz van de spanning op de Dee's). De versnelling van een deeltje tot de eindenergie van 28 MeV moet geschieden in ca $^1/_{5000}$ sec. In die tijd maakt het deeltje $10^7/5000 = 2000$ omlopen, het wordt dus 4000 maal door de Dee-spanning versneld en moet per keer 7 keV energie winnen. Bij een topwaarde van de, sinusvormig wisselende, Dee-spanning van 14 kV worden derhalve die deeltjes door de fazestabilisatie „gegrepen" en tot de eindenergie versneld, die met een fazehoek $\varphi = \arccos 7/14 \approx 60°$ ten opzichte van de top van de Dee-spanning de spleet passeren (zie A). Kiezen we nu een hogere modulatiefrequentie, dan is een kleinere hoek φ nodig, opdat het deeltje in de kortere beschikbare tijd de eindenergie van 28 MeV bereikt. Hierdoor wordt de baan echter minder stabiel, de fazetoleranties voor het „gegrepenworden" krimpen, het aantal in een groep versnelde ionen daalt. De gemiddelde bundelstroomsterkte zal dan dus minder dan evenredig met het aantal stroomstoten per seconde stijgen, en ten slotte zelfs gaan afnemen.

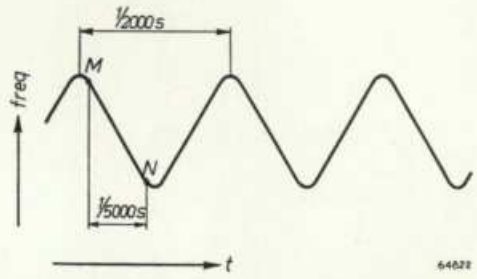


Fig. 11. Verloop van de oscillatorfrequentie met de tijd. Modulatiefrequentie 2000 Hz. Versnelling van de deuteronen heeft plaats gedurende het gedeelte MN van elke modulatieperiode.

Inderdaad nemen wij waar, dat tijdens het aanlopen van onze modulator de gemiddelde stroomsterkte op de vangschijf eerst vrijwel evenredig, daarna langzamer met de modulatiefrequentie toeneemt. Bij 2000 Hz (en 14 kV Deespanning) is het te verwachten maximum nog niet bereikt. Constructieve moeilijkheden hebben voorlopig het verder opvoeren van de modulatiefrequentie belet. Het zijn vooral de mechanische spanningen in de draaiende getande schijf die dan een ernstig probleem gaan vormen: bij een omtreksnelheid van 110 m/sec krijgt het materiaal heel wat te verduren. Vandaar ook dat voor deze schijf niet koper, doch duraluminium als constructiemateriaal moest worden gekozen.

Men ziet nu ook de reeds aangestipte invloed van de Dee-spanning op de te kiezen modulatiefrequentie. Zouden de deeltjes per keer slechts 3 kV in plaats van 7 kV winnen, dan zou de versnellingsduur $^7/_3$ maal zo lang moeten zijn en de modulatiefrequentie zou (voor dezelfde φ) slechts 850 Hz mogen bedragen. Het synchrocyclotron van Harwell werkt inderdaad met 3 kV per keer, de deeltjes moeten dus voor een eindenergie van 180 MeV 30 000 omlopen maken, en aangezien de gemiddelde oscillatorfrequentie daar ca 23 MHz bedraagt, kan dus de modulatiefrequentie in dat geval niet hoger dan ca 300 Hz worden gemaakt.

De opstelling van het Lechersysteem met modulator en Dee

Als we nu het geheel van het trillingsysteem met Dee en modulator overzien, vallen nog enkele voor het synchrocyclotron typische constructieve problemen in het oog.

De binnengeleider van het Lechersysteem moet geïsoleerd worden opgesteld. Om overmatige diëlectrische verliezen in de steunisolatoren te vermijden,

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

zal men deze bij voorkeur daar plaatsen waar geen grote hoogfrequente spanningen optreden. Zoals we in fig. 1 hebben gezien, is dit het geval nabij het midden van het Lechersysteem. We krijgen dus, globaal gesproken, het beeld van een koperen pijp van ca 15 cm diameter en ca 5 meter lang, gesteund alleen over een kort stuk nabij het midden, aan het ene eind torsend het gewicht van de Dee, aan het andere eind de kammen van de variabele condensator, waartussen met 3000 omw/min de getande schijf roteert.

Daar de koperen pijp tegen deze mechanische belasting niet opgewassen zou zijn, is zij van een inwendig frame van messing voorzien.

Een verdere complicatie is, dat de pijp, althans aan de uiteinden, in vacuum moet staan. Het lijkt het eenvoudigst om hiertoe het gehele Lechersysteem in vacuum te zetten, dus de modulatorketel en de versnellingskamer tot één doorlopende ruimte te verbinden. In dat geval moeten de koppellussen van de oscillator vacuumdicht binnengevoerd worden, terwijl elke eventuele wijziging in deze koppelingen of in de, constructief vrij ingewikkelde, modulator het nodig maakt het vacuum van het gehele cyclotron op te heffen. Wij vonden het een aantrekkelijker en voor de bedrijfszekerheid gunstiger oplossing, de vacuumruimten van de versnellingskamer en de modulator te scheiden, en dus ieder ook te voorzien van een eigen pompstelsel (zie I, fig. 1). De beide oscillator-koppellussen komen nu, gemakkelijk bereikbaar, in lucht te liggen. Aan weerskanten van de anodekoppellus komen de steunisolatoren te staan, die de binnengeleider van het Lechersysteem dragen.

Aangezien deze geleider nu de beide vacuumruimten via vacuumdichte isolatoren moet binnengaan, ligt het voor de hand, aan de steunisolatoren tevens de functie van deze doorvoering toe te vertrouwen. Immers, ook voor de doorvoerisolatoren geldt dat zij niet te ver van de spanningsknoop mogen worden geplaatst. Inderdaad is de vacuumruimte zowel van de modulator als van de versnellingskamer door een cylindrische aanbouw (die de koperen buitengeleider van het Lechersysteem omvat) verlengd tot nabij de spanningsknoop. Het bleek echter desondanks nodig de functies van steun- en doorvoerisolatoren gescheiden te houden. Deze isolatoren moeten toch reeds aan vrij ongewone eisen voldoen: zij moeten geringe diëlectrische verliezen bij een frequentie van 10 MHz hebben, in verband daarmee moet ook de diëlectrische constante klein zijn, en zij moeten een spanning althans van enige kilovolt verdragen (zover komen zij nog van de werkelijke spanningsknoop af te staan). Daar komt dan voor de doorvoerisolatoren nog bij de eis dat zij, bij grote afmetingen (de door te voeren pijp heeft 16 cm diameter) een ruimte vacuumdicht moeten kunnen afsluiten, en voor de steunisolatoren de eis dat zij sterk genoeg moeten zijn om de pijp met Dee en modulatorkammen te dragen. Door de scheiding van de functies werd voldoende vrijheid in de vormgeving verkregen om zowel in het ene als in het andere geval aan de eisen te voldoen. Als isolatiemateriaal werd hierbij het reeds genoemde „Kersima" gebruikt [2]), dat zeer goede electrische en mechanische eigenschappen, in het bijzonder een buitengewoon grote drukvastheid

[2]) Vgl. Philips techn. T. **10**, 215, 1948.

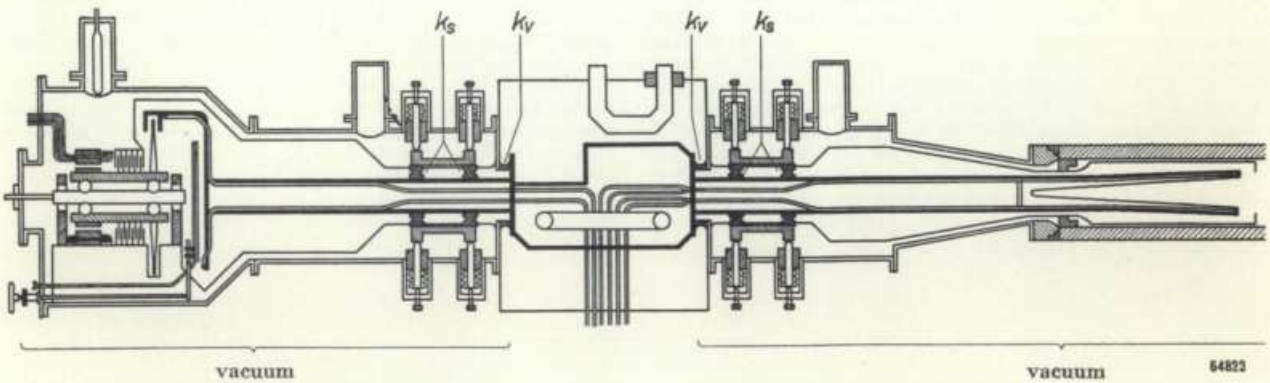


Fig. 12. Opstelling van het trillingsysteem. De ca 5 meter lange koperen binnengeleider van het Lechersysteem, met aan de einden de Dee en de kammen van de modulator (alles dik getekend), wordt gedragen door de keramische steunisolatoren k_s, die ter beperking van hun electrische belasting niet ver van de spanningsknoop in het midden van het Lechersysteem zijn geplaatst. Om aan de wijde koperen pijp de nodige stevigheid te geven, is zij van binnen van een messing frame voorzien (niet getekend). De steunisolatoren kunnen door schroeven (en vacuumdichte metalen balgen) verschoven worden voor het centreren van het systeem. De Dee en de modulator staan in gescheiden vacuumruimten, zodat het middengedeelte van het Lechersysteem met de koppellussen gemakkelijk toegankelijk is. De vacuumdichte doorvoering van het Lechersysteem geschiedt met de keramische isolatoren k_v. Voor een gedeelte zijn in deze figuur ook de koelwaterleidingen aangegeven.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

heeft (porselein zou geheel ongeschikt zijn). *Fig. 12* geeft de resulterende opstelling weer.

Completeren we het beeld nog door te memoreren dat in de geleiders van het Lechersysteem, met Dee en modulator, door hoogfrequente stromen van ca 250 ampère (effectief) in permanent bedrijf een vermogen van ruim 3 kW in warmte wordt omgezet. Ten gevolge van de geïsoleerde opstelling en de plaatsing voor het grootste gedeelte in vacuum kan het systeem de warmte slechts voor een klein deel door geleiding of door convectie kwijt. Ook de straling kan niet veel tot de koeling bijdragen, aangezien wegens de hoge frequentie het oppervlak geen behoorlijk stralend laagje mag bezitten doch juist goed blank moet worden gemaakt. Vandaar dat een voor de oningewijde op het eerste gezicht wellicht verbazend omvangrijk gebruik is gemaakt van waterkoeling: naar alle delen van het Lechersysteem, de Dee en de modulator zijn leidingen gevoerd waardoor water stroomt. Het koelwater wordt uiteraard toegevoerd in het midden van het Lechersysteem, ter plaatse van de spanningsknoop. Daar echter deze knoop in verband met de frequentiemodulatie niet geheel vastligt doch iets heen en weer zwaait, wordt het leidingstelsel verbonden aan de stedelijke waterleiding door isolerende slangen van polystyrol (zie fig. 6 rechts onderaan), die slechts zeer geringe diëlectrische verliezen hebben.

Om ten slotte nog aan een enkele bijzonderheid te demonstreren in hoe hoge mate alle constructieve details van het synchrocyclotron met elkaar verband houden, wijzen wij er op dat het in feite aan de eigenschappen van het keramische isolatiemateriaal moet worden geweten dat wij twee zendbuizen in de oscillator nodig hebben: waren de eigenschappen zodanig dat wij de steun- en doorvoerisolatoren verder uit het midden konden plaatsen, dan zou meer ruimte voor de anodekoppellus beschikbaar zijn, er zouden grotere waarden van de wederzijdse inducties M_1 en M_2 kunnen worden gerealiseerd, en er zou reeds met een geringere steilheid, dwz. een enkele buis, aan de oscillatievoorwaarde (2) kunnen worden voldaan.

Samenvatting. I. Het Philips synchrocyclotron te Amsterdam produceert in continu bedrijf deuteronen van 28 millioen electronvolt energie, die gebruikt worden voor vele soorten kerntransmutaties. De grondslagen voor het ontwerp van de installatie waren, behalve de keuze van de te versnellen deeltjes en de gewenste eindenergie, de eisen van een zo groot mogelijke bundelstroomsterkte en een zo groot mogelijke bedrijfszekerheid. Op dit ogenblik is, bij de genoemde energie, reeds een stroomsterkte bereikt van 20 microampère. De energie van 28 MeV ligt misschien nog juist in het bereik van het klassieke cyclotron, doch de toepassing van het principe van het synchrocyclotron maakt de constructie aanzienlijk eenvoudiger en economischer in het bedrijf. Het overzicht vermeldt de belangrijkste onderdelen van de installatie en geeft alvast een indruk van de omvang der benodigde hulpapparatuur.

II. Bij een synchrocyclotron kan men de te versnellen deeltjes zonder bezwaar een groot aantal omlopen laten maken, zodat in ons geval een Dee-spanning van slechts ca 15 kV_{top} nodig is. Deze spanning moet voor resonantie met de rondlopende deeltjes een frequentie van 10,7 MHz hebben (golflengte ca 30 m). Het trillingsysteem waarin deze frequentie wordt opgewekt, is gebouwd als een coaxiaal Lechersysteem, met aan elk einde een grote capaciteit (ca 400 pF), gevormd door een der Dee's (de andere Dee is geaard) resp. de modulator. Ten gevolge van de grote capaciteiten vloeien in het systeem hoogfrequente stromen van ca 350 A (topwaarde), doch dank zij een zeer zorgvuldige uitvoering is de verliesweerstand tot ongeveer 0,05 ohm beperkt, zodat niet meer dan ca 3 kW wordt verbruikt. Hiervan worden ca 560 watt als „nuttig vermogen" door de deuteronenbundel op de vangschijf gedissipeerd. Alle delen van het trillingsysteem worden zorgvuldig met water gekoeld. Het Lechersysteem wordt door een oscillatorschakeling volgens Meissner, die twee parallelgeschakelde zendbuizen TA 12/20 bevat, in trilling gebracht, zodanig dat in het midden van de Lecherleiding een spanningsknoop ontstaat. Door hoogfrequente aarding van het rooster der buizen en door een geschikte configuratie van anode- en kathodekoppellus zijn parasitaire oscillaties onderdrukt. De frequentie wordt periodiek met 4% gevarieerd door de modulator, aan het vrije einde van de Lecherleiding; deze bevat een in vacuum geplaatste condensator met een roterende, getande schijf. De aandrijvende motor kon dank zij een speciale constructie (weinig windingen, bekrachtigingstroom 185 A, bij 2,1 V spanning) eveneens in het vacuum worden geplaatst. De modulatiefrequentie is zeer hoog, nl. 2000 Hz. De vacuumruimten van modulator en versnellingskamer zijn gescheiden. De geïsoleerde, ca 15 cm dikke binnengeleider van het Lechersysteem wordt deze ruimten binnengevoerd via isolatoren van „Kersima", en uit het zelfde materiaal bestaan de steunisolatoren, die de binnengeleider inclusief de (niet-geaarde) Dee en een deel van de modulator dragen. De dragende en afsluitende isolatoren zijn dicht bij de anodekoppellus geplaatst, waar de hoogfrequente spanning laag is.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

DE ELECTRO-ANALOOG, EEN TOESTEL VOOR HET BESTUDEREN VAN REGELMECHANISMEN

I. BESTANDDELEN EN WERKING

door J. M. L. JANSSEN en L. ENSING. 621-52:621.3.012.8:53.072.13

Mathematische bewerkingen als optellen, aftrekken, vermenigvuldigen, delen, differentiëren en integreren, kunnen met behulp van electrische schakelelementen worden uitgevoerd. Hierop berust het feit dat bijv. van warmte-uitwisselings- of van mechanische processen electrische modellen kunnen worden vervaardigd. De aantrekkelijkheid hiervan is gelegen in het gemak waarmee men, gebruik makende van een oscillograaf, een voldoend nauwkeurig overzicht krijgt van de werking van het nagebootste proces, alsmede van het effect van het wijzigen van diverse parameters. Vooral bij regelinstallaties, die ten doel hebben, een bepaalde bedrijfsgrootheid constant te houden, hebben electrische modellen hun nut bewezen. Een „electro-analoog" is een verzameling instrumenten die nodig zijn om voor zulke gevallen een electrisch model samen te stellen en het gedrag ervan te bestuderen. In dit eerste artikel wordt besproken uit welke onderdelen een bepaalde electro-analoog bestaat. Op details van de electrische schakelingen zal in een volgend artikel nader worden ingegaan.

In de industrie worden tegenwoordig op grote schaal regelinrichtingen gebruikt om een bepaalde grootheid — een temperatuur, een electrische spanning, stroom of weerstand, een zuurgraad, een stromingsnelheid van een vloeistof of een gas, enz. — constant te houden. In een vorig artikel in dit tijdschrift [1]) werden enige beschouwingen hieraan gewijd. Daarbij kwam reeds ter sprake, dat, in een bepaald geval, voor het ontwerpen van de beste regelinrichting, of voor het op de beste wijze afstellen van een gegeven regelaar, de geheel theoretische weg der berekening niet te volgen is: de mathematische moeilijkheden, verbonden aan het in aanmerking nemen van alle van invloed zijnde factoren, zouden reeds in vrij eenvoudige gevallen veel te groot worden. Veelal is het evenmin raadzaam geheel empirisch te werk te gaan, daar dit kan leiden tot langdurige storingen in het industriële proces, met de daaruit voortvloeiende achteruitgang van kwantiteit of kwaliteit der productie.

Zoals in het aangehaalde artikel reeds werd vermeld, kan vaak een oplossing worden gevonden door te werken met een electrisch model van het te regelen proces en van de regelaar, waarbij de tijdschaal zo is gekozen dat men de verschijnselen op een oscillograaf kan waarnemen. De meting aan het werkelijke proces kan beperkt blijven tot het opnemen van de sprongkarakteristiek, d.i. de karakteristiek die aangeeft hoe de te regelen grootheid als functie van de tijd reageert op een plotselinge verandering van de regelende grootheid aan de ingang van het proces. Het electrische model

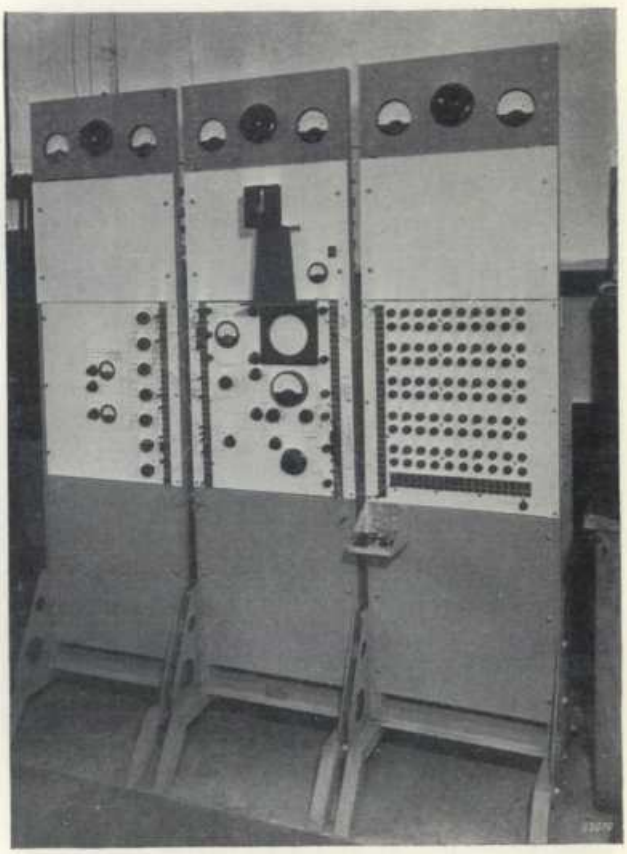


Fig. 1. Overzichtsfoto van de electro-analoog. Het linkerrek bevat in hoofdzaak het model van de regelaar, het middelste rek de oscillograaf en toebehoren, en het rechterrek het model van het proces. Bovenaan op ieder rek een regeltransformator voor het instellen van de juiste voedingswisselspanning, afleesbaar op de voltmeter rechts, en een ampèremeter (links) die het totale stroomverbruik van het rek aanwijst.

[1]) H. J. Roosdorp, Philips techn. T. **12**, 225-231, 1950 (No. 8).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van het proces moet zo worden samengesteld dat het een gelijkvormige sprongkarakteristiek vertoont.

Beschikt men eenmaal over een apparatuur die er op is ingericht zulk een „analoog" procesmodel samen te stellen, die voorts een model van de regelaar bevat waarin men naar behoefte een proportionele, een integrerende en een differentiërende term kan laten meewerken, en die bovendien nog een oscillograaf, een sprong-generator en verder toebehoren omvat, dan kan men in een oogopslag het effect zien van het wijzigen van diverse parameters in de regelaar, van het aanbrengen van storingen op verschillende plaatsen, enz. Zulk een apparatuur is de „electro-analoog", waarvan een bepaalde uitvoering is afgebeeld in *fig. 1*.

Meer nog dan als hulpmiddel voor het oplossen van concrete regelvraagstukken heeft de electro-analoog zijn nut bewezen bij de „research" op regelgebied. De grote verscheidenheid van modellen — ook niet-lineaire — die er mee kunnen worden samengesteld, en de aanschouwelijkheid van de resultaten hebben zeer veel bijgedragen tot het inzicht in regelproblemen.

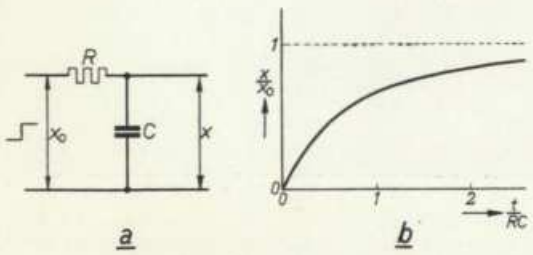
Wij zullen eerst beschrijven uit welke onderdelen de door ons gebouwde electro-analoog bestaat, en in een volgend artikel de electrische uitvoering van de interessantste onderdelen nader bespreken.

Proces-analoog

Analoog netwerk voor enige geïdealiseerde processen

Het heeft niet ontbroken aan pogingen om de sprongkarakteristiek van een meer of minder geïdealiseerd proces in mathematische vorm te brengen en vervolgens deze vorm te „vertalen" in een electrisch netwerk dat dienst kan doen als „proces-analoog", d.i. als electrisch model van het proces.

Vele processen zijn in hoofdzaak gekarakteriseerd door een traagheid, die bijv. wordt veroorzaakt



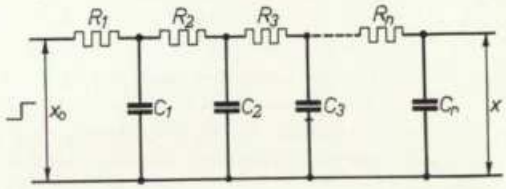
64944

Fig. 2. *a*) Weerstand R en capaciteit C in serie, als het eenvoudigste electrische model van een proces met warmteweerstand en warmtecapaciteit. *b*) Sprongkarakteristiek van dit netwerk.

door een warmteweerstand en een warmtecapaciteit. Het ligt voor de hand dat men in zulke gevallen in eerste benadering de proces-analoog kan samenstellen uit een weerstand R en een condensator C in serie (*fig. 2a*). De sprongkarakteristiek van deze schakeling (fig. 2*b*) heeft tot vergelijking:

$$\frac{x}{x_0} = 1 - e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Hierin is x_0 de grootte van de aangelegde spanningsprong, x de spanning over de condensator en t de tijd.

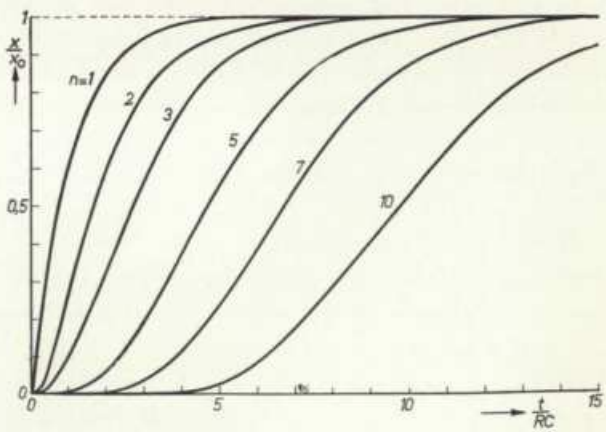


61945

Fig. 3. Uitbreiding van het in fig. 2*a* afgebeelde netwerk tot een reeks van n in cascade geschakelde R-C-secties.

Meestal echter heeft men te maken met een reeks warmte- (of andere) -weerstanden en -capaciteiten. Een schakeling volgens *fig. 3* geeft dan een betere benadering van de toestand. In dit netwerk vormen de secties R_2-C_2, R_3-C_3 enz. een zekere belasting voor alle voorafgaande secties, hetgeen in een werkelijk proces ook min of meer het geval is.

Andere hypothetische processen, in combinatie met een regelaar, zijn theoretisch bestudeerd door mathematici van de Bataafsche Petroleummaatschappij [2]); een dezer processen vindt zijn electrisch



64944

Fig. 4. Berekende sprongkarakteristieken voor $n = 1$ tot 10 secties van het netwerk volgens fig. 3, met gelijke weerstanden R en capaciteiten C in alle secties, die onderling zijn gescheiden door tussengeschakelde versterkbuizen, zodat ze geen belasting vormen voor de voorafgaande secties.

[2]) P. Hazebroek en B. L. van der Waerden, The optimum adjustment of regulators, Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs. **72**, 317-322, 1950 (No. 3).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

analogon in een reeks *R-C*-secties waarbij de zoëven genoemde belasting van de voorafgaande secties door de volgende niet aanwezig is. Dit geval laat zich realiseren door in de schakeling volgens fig. 3 de secties onderling te scheiden door versterkbuizen (voor bijzonderheden zij verwezen naar het vervolgartikel). De berekende sprongkarakteristieken van zulk een netwerk voor verschillende aantallen secties vindt men in *fig. 4*.

Om de goede werking van de electro-analoog te verifiëren, is deze voorzien van beide soorten *R-C*-netwerken. Het netwerk zonder buizen bestaat uit 20 „gekoppelde", dat mèt buizen uit 40 „ontkoppelde", gelijke secties, waarvan een willekeurig aantal kan worden gebruikt. *Fig. 5* toont de oscillogrammen van de sprongkarakteristieken van 10 secties van beide netwerken.

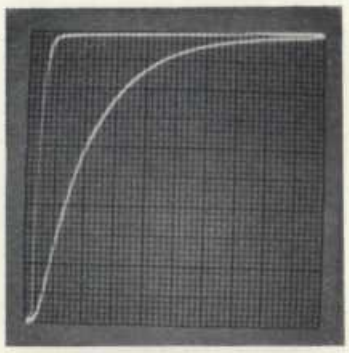


Fig. 5. Oscillografisch opgenomen sprongkarakteristieken van 10 secties van een *R-C*-netwerk; bovenste kromme: met ontkoppelde, onderste kromme: met niet-ontkoppelde secties. De bovenste kromme komt overeen met de berekende kromme voor $n = 10$ van fig. 4 (de tijdschalen zijn zeer verschillend).

In het bijzonder voor „research"-doeleinden hebben deze schakelingen goede diensten bewezen. Een universele proces-analoog, waarmee iedere sprongkarakteristiek kan worden verkregen, vormen zij echter niet. Om te komen tot zulk een universele procesanaloog, is afgezien van iedere electrische analogie met de physische werking van het werkelijke proces, doch is getracht een schakeling te vinden waarmee een willekeurige sprongkarakteristiek voldoende dicht wordt benaderd door een gebroken lijn.

Universele proces-analoog

In de door ons gebruikte universele proces-analoog wordt gebruik gemaakt van een electrisch vertragingsnetwerk [3]). Dit bestaat uit een groot aantal uit condensatoren en spoelen opgebouwde secties, die zodanig zijn ingericht dat spanningen onverzwakt worden doorgegeven met een vertragingstijd τ die in een zeer groot frequentiegebied onafhankelijk is van de frequentie. Zet men op de ingang van het netwerk een spanning V_0 met de vorm van een eenheidsfunctie — dit is een functie die vóór een zeker tijdstip t_0 voortdurend nul was en van het moment t_0 af voortdurend de waarde 1 heeft —, dan vertoont de spanning V_1 na de eerste sectie eveneens de vorm van een eenheidsfunctie, waarvan echter de sprong een tijd τ later komt (*fig. 6*), dus bij $t_0 + \tau$; de spanning V_2 na de tweede sectie, ook met de vorm van een eenheidsfunctie, maakt de sprong bij $t_0 + 2\tau$, enz.

Beschikt men nu over een inrichting waarmee willekeurige fracties $a_0, a_1, a_2, \ldots$ van de spanningen $V_0, V_1, V_2, \ldots$ bij elkaar kunnen worden opgeteld — welke fracties onafhankelijk van elkaar tussen de grenzen $+ a_{max}$ en $- a_{max}$ regelbaar moeten zijn —, dan kan men een somspanning V_s doen ontstaan:

$$V_s = a_0 V_0 + a_1 V_1 + a_2 V_2 + \ldots,$$

met de vorm van een trapjeskromme (*fig. 7*), waarmee men de gemeten sprongkarakteristiek van ieder werkelijk proces goed kan benaderen.

Nog aanzienlijk beter wordt de benadering als men de spanning V_0, die de vorm van een eenheidsfunctie heeft, eerst omzet in een spanning V_0' welke in het interval τ lineair van 0 tot de maximale waarde aangroeit. Deze vormverandering kan tot

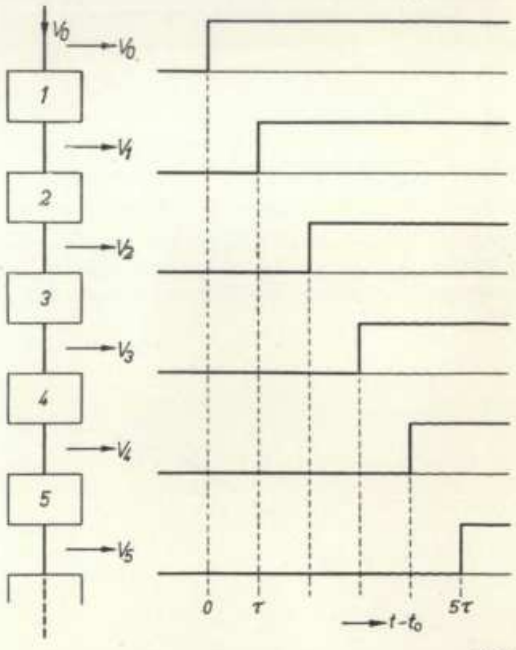


Fig. 6. Links: vertragingsnetwerk met secties *1*, *2*, *3*, ... Wordt op de ingang een spanningsprong V_0 gezet (zie rechterdeel van de fig.), dan ontstaan aan de uitgangen van de secties even grote spanningsprongen V_1, V_2, V_3,..., die ten opzichte van V_0 een tijd τ, 2τ, 3τ, ... zijn verschoven.

[3]) Brits octrooischrift 517 516, op naam van A. D. Blumlein, H. E. Kallmann en W. S. Percival.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

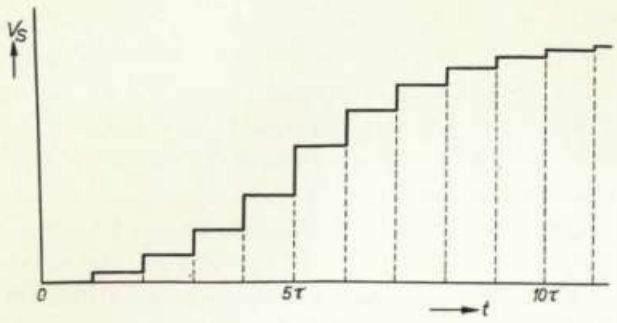


Fig. 7. Telt men regelbare fracties a van de spanningen V_0, V_1, V_2, V_3, ... van fig. 6 bij elkaar op, dan ontstaat een somspanning V_s met de vorm van een trapjeskromme, waarmee men, door variatie van de coëfficienten a, iedere kromme kan benaderen.

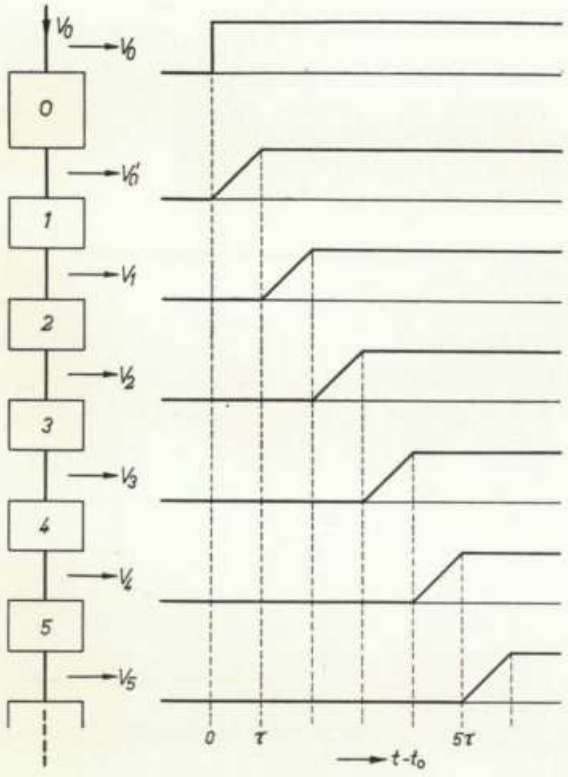


Fig. 8. Als fig. 6, doch het vertragingsnetwerk wordt hier voorafgegaan door een sectie *0* die de sprongspanning V_0 omzet in een spanning V_0' welke in het interval τ lineair met de tijd oploopt.

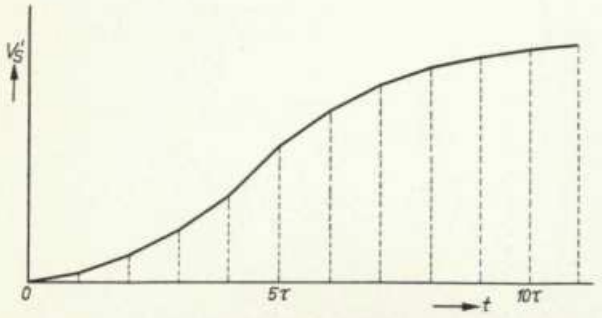


Fig. 9. Optelling van regelbare fracties a van de spanningen V_0', V_1, V_2, V_3, ... van fig. 8 levert een somspanning V_s' waarvan de krommevorm dichter bij een vloeiende kromme aansluit dan de trapjeskromme van fig. 7.

stand komen in een sectie (*0* in *fig. 8*) die vóór het vertragingsnetwerk wordt geschakeld. De spanningen V_0', V_1, V_2, ... vertonen dan de rechts in fig. 8 weergegeven vorm, en de somspanning V_s' krijgt een bijna vloeiend verloop (*fig. 9*).

In onze electro-analoog wordt de laatst geschetste methode toegepast. Het vertragingsnetwerk bestaat uit 50 secties. Van knikken in de verkregen kromme van de somspanning is daarbij niets meer te bespeuren.

Oscillograaf en sprongenerator

Om de sprongkarakteristiek van de proces-analoog gelijk te kunnen maken aan die van het werkelijke proces, moet men beide karakteristieken gelijktijdig kunnen waarnemen. Hiertoe wordt het verloop van de uitgangspanning V_s' van het vertragingsnetwerk zichtbaar gemaakt op een kathodestraaloscillograaf, terwijl tegen het scherm van de oscillograafbuis een doorzichtig, van een coördinatennet voorzien blad cellofaan is geplaatst, waarop de gemeten sprongkarakteristiek van het

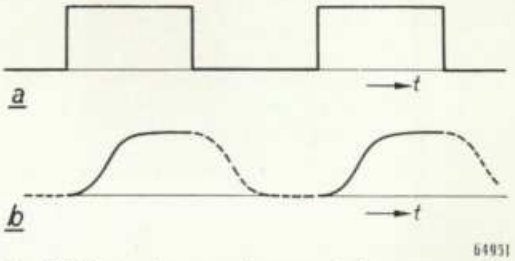


Fig. 10. *a*) Blokvormige spanning aan de ingang van de sectie *0* (fig. 8). *b*) Voorbeeld van het verloop der somspanning V_s', dat op een oscillograaf wordt afgebeeld (het gestippelde gedeelte blijft daarbij onzichtbaar).

werkelijke proces is uitgezet. Door draaien aan de knoppen waarmee de coëfficienten a_0, a_1, ... a_{50} worden gevarieerd (zie het rechterrek in fig. 1), maakt men de karakteristiek van de proces-analoog zo goed mogelijk identiek aan de getekende kromme.

Ter wille van de oscillografische waarneming is het gewenst, de spanning V_0 niet éénmaal een sprong te laten maken, maar de sprong periodiek te herhalen, dwz. een blokvormige spanning te gebruiken (*fig. 10a*). Deze wordt opgewekt in een sprongenerator. Hierin wordt van een aan het net ontleende sinusvormige spanning (50 Hz) een groot deel van de toppen afgesneden, zodat een nagenoeg zuiver blokvormige spanning overblijft.

De uitgangspanning V_s' van de proces-analoog heeft nu een vorm als bijv. in fig. 10*b* is weergegeven. Door onderdrukking van de electronenbundel in de kathodestraalbuis wordt telkens het gestippelde

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

deel van deze kromme onzichtbaar gemaakt. Het getrokken gedeelte wordt vormgetrouw op de oscillograaf afgebeeld, aangezien in de desbetreffende halve perioden de tijdasspanning een lineaire zaagtandvorm heeft.

Modellen van continu werkende regelaars

In het aangehaalde artikel [1]) werden de regelaars verdeeld in discontinu en continu werkende regelaars. We beschouwen eerst alleen deze laatste; discontinu werkende regelaars komen nog ter sprake in het laatste hoofdstuk van dit artikel.

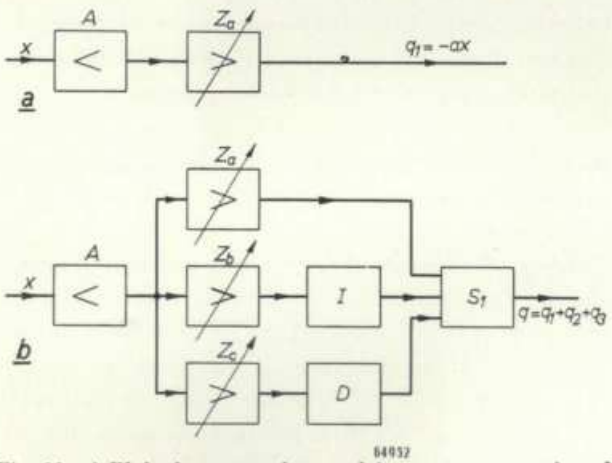


Fig. 11. *a*) Blokschema van het model van een proportioneel werkende regelaar: versterker A en regelbare verzwakker Z_a. *b*) Blokschema van het model van een regelaar met proportionele, integrerende en differentiërende werking. A is een gemeenschappelijke versterker, I de integrator, D de differentiator. De coëfficienten a, b en c van de drie componenten worden ingesteld met de regelbare verzwakkers Z_a, resp. Z_b en Z_c. S_1 is een verzameltrap, waarin de drie componenten worden opgeteld.

In de betrekking die bestaat tussen het bedrag x waarmee de te regelen grootheid van de gewenste waarde afwijkt, en het bedrag q waarmee dientengevolge de regelende grootheid door de regelaar wordt veranderd, kunnen verschillende termen voorkomen, bijv. een proportionele, een integrerende en een differentiërende term [4]):

$$q = -ax - b\int x\,dt - c\frac{dx}{dt} = q_1 + q_2 + q_3. \quad (1)$$

Deze drie termen moeten kunnen worden gerealiseerd in het electrische model van de regelaar, in welk model de coëfficienten a, b en c variabel moeten zijn.

De proportionele term, $q_1 = -ax$, is gemakkelijk te realiseren door middel van een electronische versterker. De regelbaarheid van a kan worden verkregen door er een regelbare verzwakker aan toe te voegen (*fig. 11a*).

De integrerende term, $q_2 = -b\int x dt$, en de differentiërende term, $q_3 = -c\,dx/dt$, worden verkregen met behulp van een integrerend, resp. een differentiërend netwerk. Afzonderlijke verzwakkers zorgen voor de regelbaarheid van de coëfficienten b en c (fig. 11*b*). In een „verzameltrap" S_1 worden ten slotte de drie spanningen, q_1, q_2, en q_3, gesommeerd.

De electro-analoog is voorzien van een tweede integrator en een tweede differentiator, waarmee ook termen van het type $b_2\int\int x\,dt\,dt$ en $c_2\,d^2x/dt^2$ kunnen worden toegevoegd; in de regel bestaat hieraan echter geen behoefte.

Vorm en plaats van de storingen

Heeft men op de besproken wijze een proces-analoog samengesteld, dan wordt dit netwerk verenigd met het model van de regelaar volgens fig. 11*b* tot een gesloten regelcircuit (*fig. 12*). Hieraan is, in vergelijking met fig. 11*b*, een gemeenschappelijke verzwakker Z_0 toegevoegd, waarmee de coëfficienten a, b en c gelijktijdig worden gevarieerd.

De oscillograaf kan door middel van een snoer op verschillende punten van het circuit worden aangesloten. Blijkt daarbij dat de toestand stabiel is — hetgeen steeds kan worden bereikt door bij Z_0 voldoende verzwakking in te schakelen —, dan is

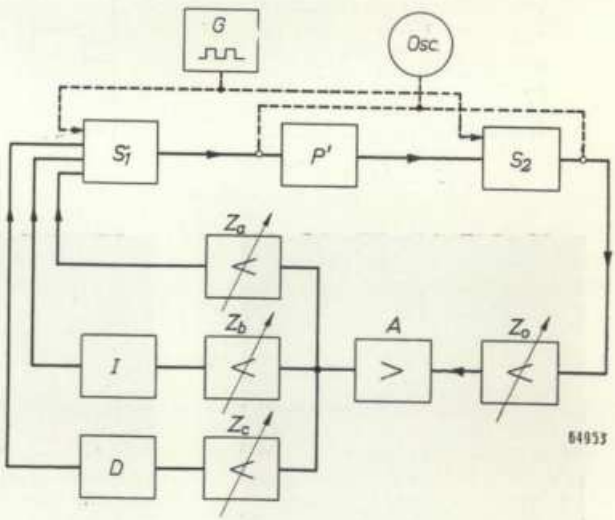


Fig. 12. Blokschema van het model van een regelcircuit. P' proces-analoog, waarvan de sprongkarakteristiek gelijkvormig is gemaakt met die van een werkelijk proces. Z_0, A, Z_a, Z_b, Z_c, I, D en S_1 vormen het model van de regelaar (fig. 11). G generator van een blokvormige stoorspanning, die bijv. aan de ingang van het proces (bij S_1) of aan de uitgang er van (bij de daartoe aangebrachte verzameltrap S_2) kan worden aangesloten. De oscillograaf *Osc* kan met verschillende punten van het circuit worden verbonden. Z_0 is een gemeenschappelijke verzwakker.

[4]) Teneinde positieve getalwaarden van a, b en c te verkrijgen, hebben wij, in afwijking van het in noot [1]) geciteerde artikel, deze factoren voorzien van een minteken.

Dat q en x verschillend teken moeten hebben, volgt hieruit dat de regelaar een wijziging van q moet bewerkstelligen die een voorafgegane verandering van x tegenwerkt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

aan alle ingangs- en uitgangsklemmen van de tot het regelcircuit behorende onderdelen de spanning nul. Brengt men ergens een storing aan, dan treden aan de uitgang van de proces-analoog en aan die van het regelaarmodel spanningen op, die evenredig zijn met de grootheden x, resp. q; op de oscillograaf kan men nu nagaan hoe deze zich bij verschillende waarden van de coëfficienten a, b en c gedragen.

De storingen die in de practijk in een regelsysteem optreden, kunnen worden onderscheiden zowel naar hun vorm (als functie van de tijd) als naar de plaats in het circuit waar zij zich voordoen.

Naar de vorm onderscheidt men sprongsgewijze en continu verlopende storingen. Daar deze laatste kunnen worden opgevat als de limiet van een oneindig groot aantal, oneindig kleine en na elkaar optredende, sprongetjes (vgl. fig. 7), is het voldoende, alleen de reactie van het systeem op sprongsgewijze storingen na te gaan. Als storingsbron kan dus de voor het instellen van de proces-analoog gebruikte generator van blokvormige spanning dienst doen.

Naar de plaats van optreden onderscheidt men:

1) storingen in het stuurorgaan, dus aan de ingang van het proces,
2) storingen ergens „onderweg" in het proces, en
3) storingen in de opnemer, dus aan de uitgang van het proces.

Onder deze „storingen" kunnen ook worden gerekend de veranderingen die men bewust aan het instelpunt geeft indien men op een andere waarde van de geregelde grootheid wenst over te gaan. Met het oog op deze onderscheiding is ook de spronggenerator voorzien van een snoer, waarmee hij kan worden aangesloten, hetzij op de ingang van het proces (d.i. op de ingang van de verzameltrap S_1), hetzij op de uitgang van het proces, waartoe een tweede verzameltrap, S_2, is aangebracht (fig. 12). Worden op deze beide plaatsen aangebrachte storingen in voldoende mate weggeregeld, dan is dat ook het geval met de sub (2) genoemde storingen, die ergens onderweg optreden.

Oscillogrammen verkregen met modellen van continu werkende regelaars

Enige oscillografische opnamen zullen de invloed van de verschillende termen in de regelkarakteristiek (verg. (1)) verduidelijken. De onderste kromme van fig. 5 toont de sprongkarakteristiek van de proces-analoog die bij deze opnamen werd gebruikt (10 secties van het R-C-netwerk volgens fig. 3).

Eerst enkele voorbeelden van een geval waarin alleen met proportionele regeling werd

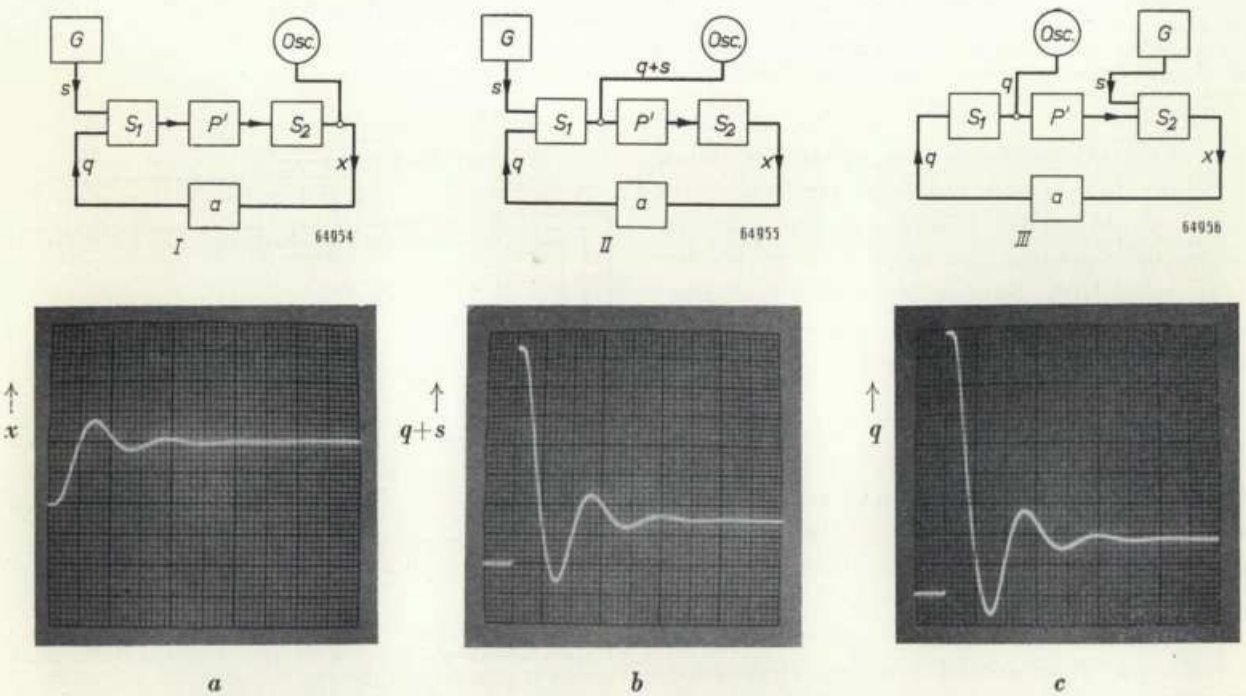


Fig. 13. Met de electro-analoog opgenomen oscillogrammen. De proces-analoog (10 niet-ontkoppelde R-C-secties) had de onderste kromme van fig. 5 tot sprongkarakteristiek. De regelaar had alleen een proportionele term ($a = 4$) en is in de blokschema's *I*, *II* en *III* aangeduid met de rechthoek *a*. In deze schema's is tevens aangegeven waar de generator *G* en de oscillograaf *Osc* tijdens het opnemen van de er onder weergegeven oscillogrammen waren aangesloten.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

gewerkt, met $a = 4$ (12 dB) [5]). *Fig. 13-I* laat zien dat, via de verzameltrap S_1, de proces-analoog de som van de uitgangspanning $q = -a\,x$ van de regelaar en de sprongspanning s van de spronggenerator krijgt toegevoerd, en dat de uitgangspanning x van de proces-analoog op de oscillograaf wordt gezet. Fig. 13*a* is het verkregen oscillogram, op dezelfde schaal als fig. 5.

In fig. 13-*II* is aangegeven dat op de oscillograaf $q + s$ wordt afgebeeld. Men onderkent in het bijbehorende oscillogram (fig. 13*b*) gemakkelijk de van de spronggenerator afkomstige sprong s, die

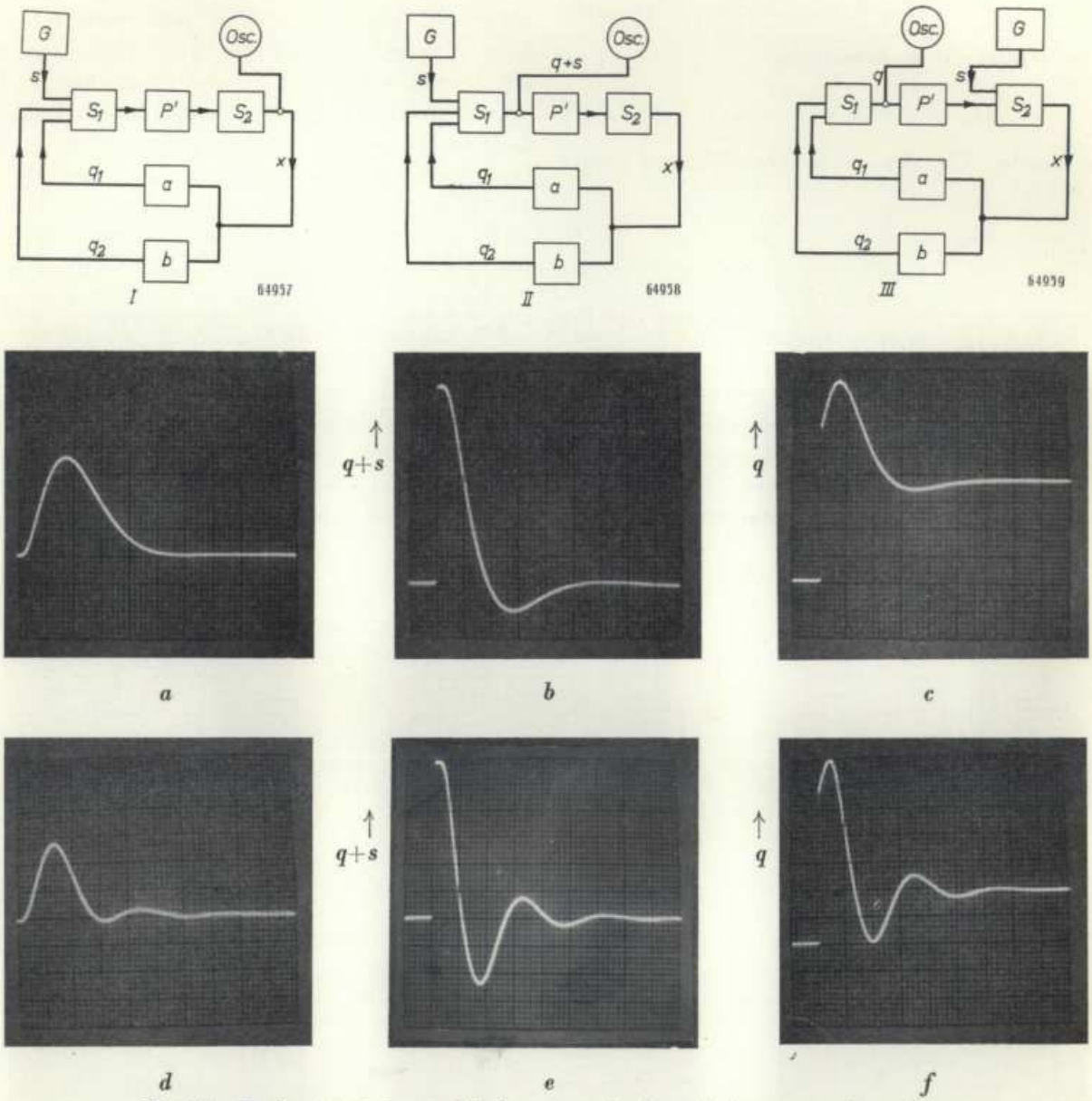


Fig. 14. Als fig. 13, doch met behalve proportionele, ook integrerende werking in de regelaar. Bij de opnamen (*a*), (*b*) en (*c*) was $a = 1{,}6$ en $b = 1{,}25$ millisec^{-1}, bij de opnamen (*d*), (*e*) en (*f*) was $a = 3{,}2$ en $b = 3{,}2$ millisec^{-1}.

[5]) In het model zijn x en q beide electrische spanningen en is $a = -q/x$ derhalve een dimensieloze grootheid. Doch ook bij het werkelijke proces heeft a geen dimensie indien men x uitdrukt in percenten van de gewenste waarde der te regelen grootheid en q in percenten van de bijbehorende waarde der regelende grootheid.

Het uitdrukken van a in decibels heeft het practische voordeel dat men de totale waarde van a vindt door de aflezingen van de diverse, in dB geijkte, verzwakkers (Z_0 en Z_a in fig. 12) en de in dB uitgedrukte versterking (van A in fig. 12) op te tellen, hetgeen gemakkelijker is dan vermenigvuldigen.

wordt gevolgd door een oscillerend verloop van q.

Uit de oscillogrammen ziet men dat x en $q + s$ (dus q) op den duur constant worden. De eindwaarden hangen als volgt samen met de grootheid a.

De versterking van de proces-analoog (losgemaakt van de regelaar) is zodanig ingesteld dat een sprongvormige storing met de amplitude s, aangebracht op de ingang, een verandering van de uitgang-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

spanning veroorzaakt waarvan de eindwaarde x_∞ juist gelijk is aan s. Is in het gesloten regelcircuit aan de ingang van de proces-analoog bovendien de uitgangspanning q van de regelaar aanwezig, met de eindwaarde q_∞, dan geldt in de stationnaire toestand:

$$x_\infty = q_\infty + s. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

In de regelaar is de betrekking

$$q_\infty = -ax_\infty. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

van kracht. Uit deze twee vergelijkingen volgt:

$$x_\infty = \frac{1}{1+a}s \quad \ldots\ldots\ldots \quad (4)$$

en

$$q_\infty = \frac{-a}{1+a}s. \quad \ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Uit (4) ziet men dat x_∞ kleiner wordt — dwz. dat een storing beter wordt „weggeregeld" — naarmate a groter is, maar dat x_∞ nooit geheel nul wordt (statische onnauwkeurigheid). Verg. (5) kan men in fig. 13*b*, waarvoor $a = 4$, numeriek verifiëren.

Volgens fig. 13-*III* wordt in de verzameltrap S_2 de sprong s samengevoegd met de uitgangspanning van de proces-analoog; de som van beide is x genoemd. Daar de regelaar slechts een proportionele term bevat, is het oscillogram van q (fig. 13*c*) gelijkvormig met dat van fig. 13*b*.

Bevat de regelaar ook een integrerend element (*fig. 14*), dan wordt x, zoals reeds in het in noot [1]) aangehaalde artikel werd besproken, na een storing wèl geheel tot nul teruggebracht. Op het integrerende element na komen de schakelingen *I*, *II* en *III* van fig. 14 overeen met die van fig. 13. De bijbehorende oscillogrammen fig. 14*a*, 14*b* en 14*c* hebben betrekking op het geval $a = 1{,}6$ (4 dB) en $b = 1{,}25$ millisec^{-1}, en de oscillogrammen fig. 14*d*, 14*e* en 14*f* op het geval $a = 3{,}2$ (10 dB) en $b = 3{,}2$ millisec^{-1}.

De oscillogrammen fig. 14*c* en 14*f* kunnen als volgt worden geïnterpreteerd. De traagheid van de proces-analoog is oorzaak dat de aanwezigheid van dit onderdeel direct na de sprong nog niet merkbaar is. Op de oscillograaf krijgt men dus een sprong $-as$ te zien (in het oscillogram een sprong omhoog). Deze wordt aanvankelijk gevolgd door

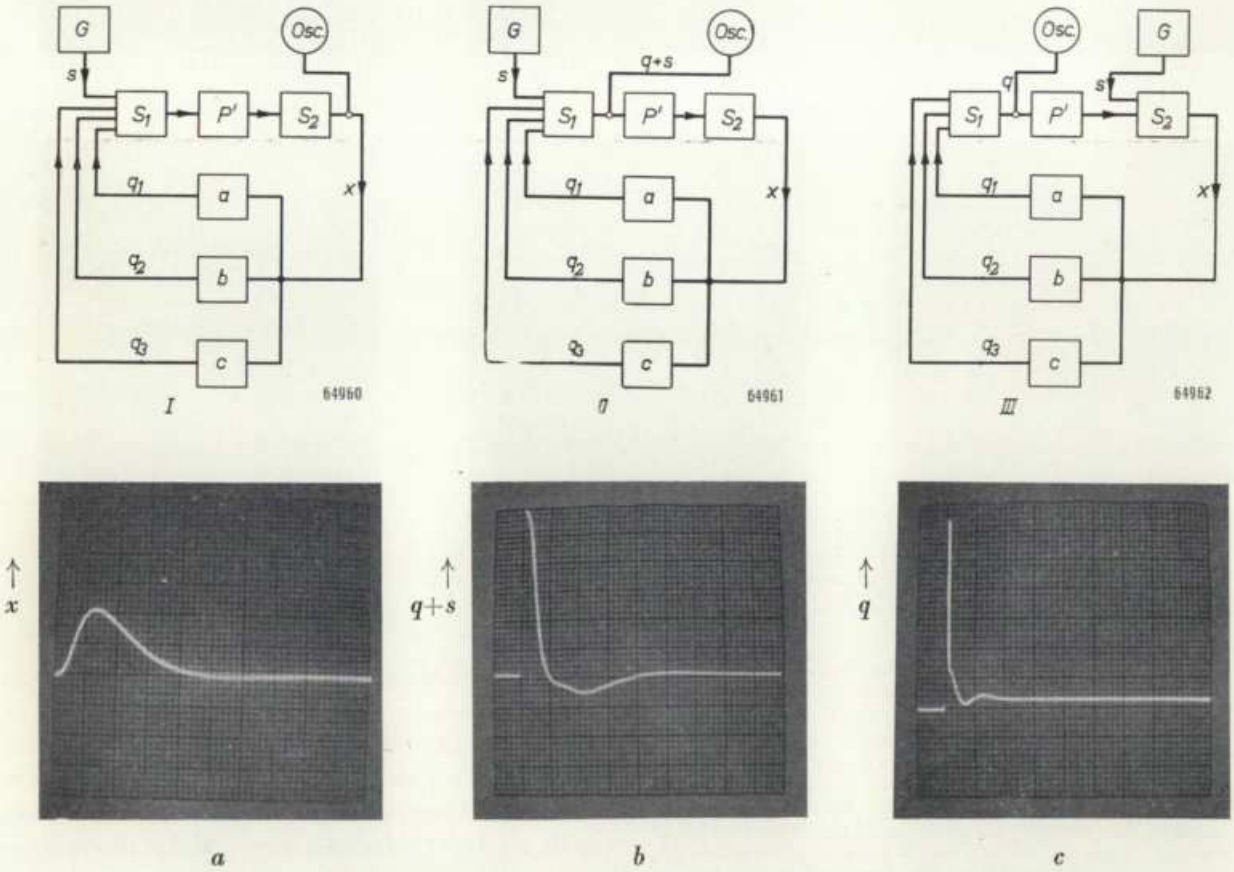
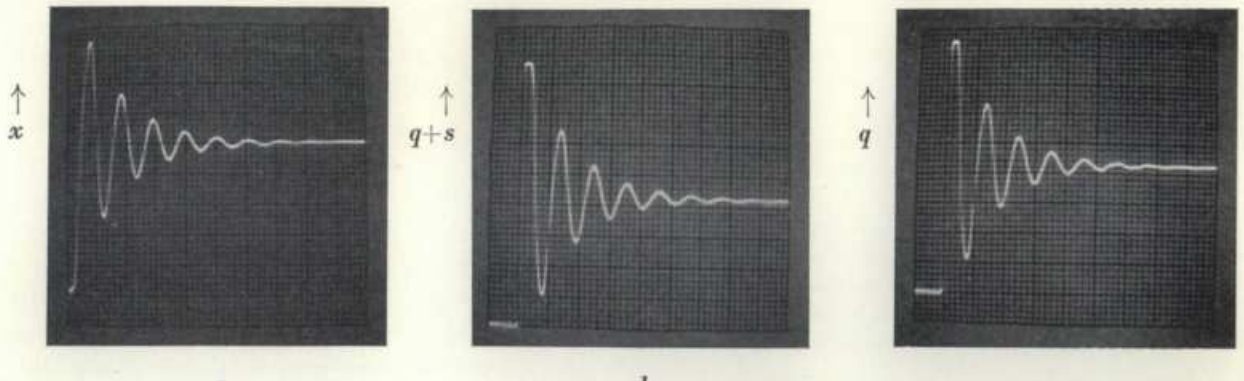


Fig. 15. Als fig. 14, doch met bovendien differentiërende werking in de regelaar ($a = 3{,}2$, $b = 3{,}2$ millisec^{-1}, $c = 1$ millisec).

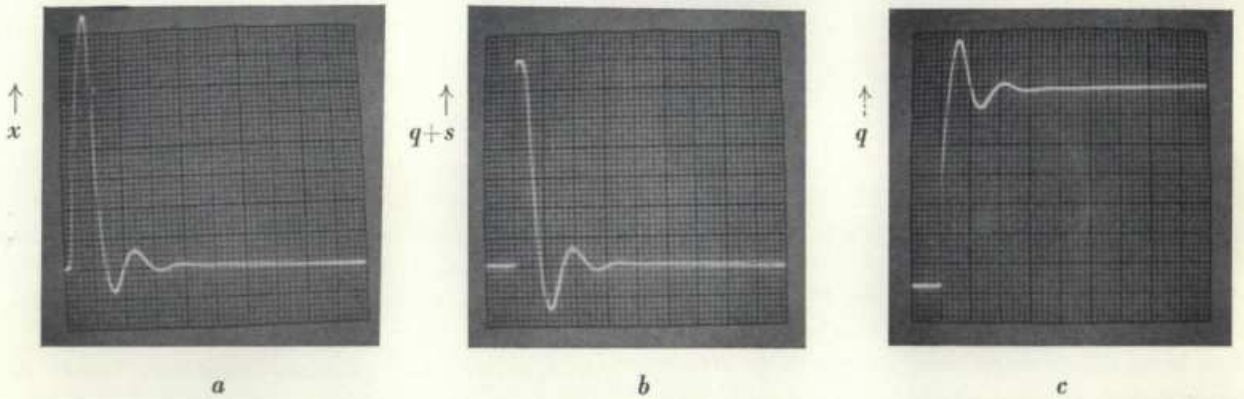
Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023



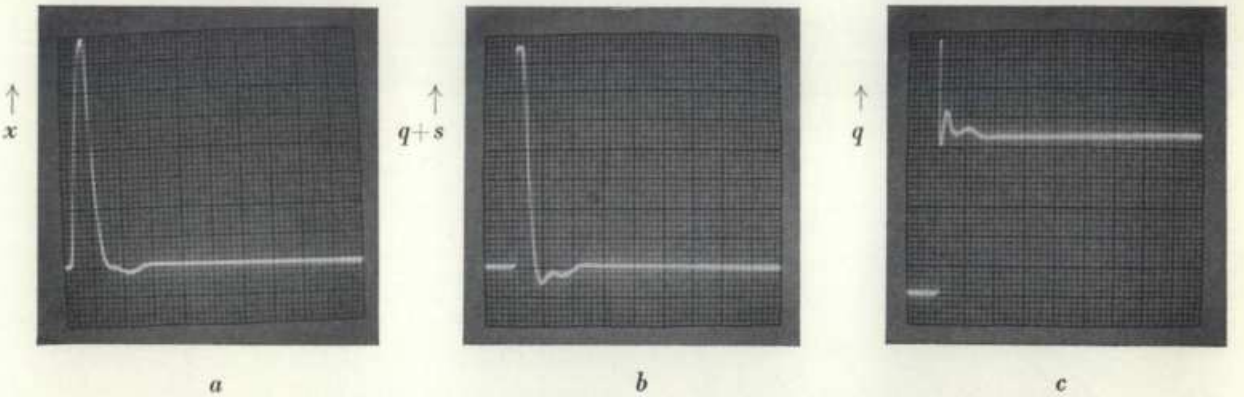
a b c

Fig. 16. Als fig. 13, doch met als proces-analoog een netwerk waarvan de bovenste kromme van fig. 5 de sprongkarakteristiek is (10 ontkoppelde *R-C*-secties). De coëfficient *a* van de proportionele term was hier 1.



a b c

Fig. 17. Als fig. 14, doch met als proces-analoog een netwerk waarvan de bovenste kromme van fig. 5 de sprongkarakteristiek is. $a = 0{,}5$ en $b = 2$ millisec^{-1}.



a b c

Fig. 18. Als fig. 15, doch met als proces-analoog een netwerk waarvan de bovenste kromme van fig. 5 de sprongkarakteristiek is, $a = 0{,}5$, $b = 2{,}5$ millisec^{-1}, $c = 0{,}08$ millisec.

een lineair oplopen, in overeenstemming met de aanwezigheid van het integrerende element in de regelaar, dat een spanning $-b\int s \cdot dt = -b\,s\,t$ levert, die lineair met de tijd toeneemt. Dan echter wordt merkbaar dat de proces-analoog aanwezig is, die nu ook een zekere spanning tot de ingang van de regelaar gaat bijdragen. In de eindtoestand geldt weer verg. (2), doch aangezien nu $x_\infty = 0$, is $q_\infty = -s$, dwz.: voor het wegregelen van een storing aan de uitgang van het proces is een blijvende wijziging in de stand van het stuurorgaan nodig. Voorts is de aanvankelijke sprong q_0 die q maakte, gelijk aan $-a\,s$. De verhouding van deze sprong tot de eindwaarde van q, dus q_0/q_∞, is derhalve gelijk aan a, hetgeen men in fig. 14*c* en 14*f* kan constateren.

Fig. 15 ten slotte vertoont gelijksoortige opnamen voor het geval dat de regelaar bovendien nog een differentiërend element bevat ($a = 3{,}2$, $b = 3{,}2$ millisec^{-1}, $c = 1$ millisec). Blijkbaar werkt de differentiatie stabiliserend op de regeling.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Soortgelijke krommen, doch nu opgenomen met een proces-analoog waarvan de sprongkarakteristiek de gedaante heeft van de bovenste kromme in fig. 5, zijn weergegeven in *fig. 16*, *17* en *18*, op dezelfde schaal als fig. 13, 14 en 15. Vergelijking van deze beide groepen oscillogrammen laat zien, dat een proces dat kan worden voorgesteld door *R-C*-secties die de voorafgaande secties belasten, zich in het algemeen beter laat regelen dan een (hypothetisch) proces dat correspondeert met ontkoppelde *R-C* secties: de geregelde grootheid maakt in het eerste geval kleinere amplituden (vgl. bijv. fig. 13*a* en 16*a*), en de toestand in fig. 16, met *a* slechts = 1, is kennelijk minder stabiel dan die in fig. 13 met $a = 4$.

Criteria voor de beste regeling

Stabiliteit

Een indruk van de stabiliteit krijgt men reeds door een eenvoudige beschouwing van de oscillogrammen (bijv. fig. 13 en 16): hoe kleiner de demping van eventuele trillingen is, des te geringer is de stabiliteit. Uit de krommen kan men echter niet zien of, in een stabiel geval, misschien reeds door een kleine verandering van de bedrijfsomstandigheden of van de coëfficienten *a*, *b* en *c* de toestand instabiel kan worden. (Een verandering van de coëfficienten kan bijv. het gevolg zijn van slijtage in onderdelen van de regelaar.)

Een beter inzicht in de stabiliteit wordt verkregen door opmeten van het stabiliteitsgebied. Een proces met alleen proportionele regeling ($q_1 = -ax$) kan instabiel worden wanneer *a* een zekere waarde overschrijdt. Heeft de regelaar uitsluitend een integrerende component ($q_2 = -b\int x\,dt$), dan kan eveneens de stabiliteit verloren gaan wanneer *b* te groot wordt. Een regelaar met beide werkingen heeft,

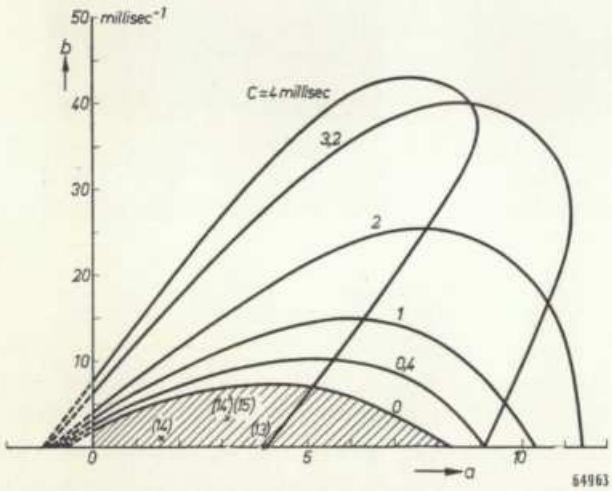


Fig. 19. Waarden van de coëfficient *b* van de integrerende term waarbij juist instabiliteit intreedt, als functie van de coëfficient *a* van de proportionele term, voor constante waarden van de coëfficient *c* van de differentiërende term. Deze figuur geldt voor een proces waarvan de onderste kromme van fig. 5 de sprongkarakteristiek is. Het stabiliteitsgebied voor $c = 0$ is gearceerd. De punten (*13*), (*14*), (*14'*) en (*15*) komen overeen met de toestanden waarbij de oscillogrammen van fig. 13, resp. 14*a*, *b*, *c*, 14 *d*, *e*, *f*, en 15 werden opgenomen.

bij een bepaald proces, bij iedere waarde van *a*, een zekere grenswaarde van *b* waarboven instabiliteit optreedt; de kromme die deze grenswaarde als functie van *a* voorstelt, omsluit met de *a*-as het stabiliteitsgebied. Indien de regelaar bovendien een, differentiërende component heeft ($q_3 = -c\,dx/dt$), geldt voor iedere waarde van de parameter *c* een andere betrekking tussen de grenswaarden van *b* en *a*. Voor de proces-analoog waarvan de onderste kromme in fig. 5 de sprongkarakteristiek is, zijn in *fig. 19* een aantal met de electro-analoog bepaalde krommen $b = f(a)$, $c =$ constant, weergegeven.

Zijn uit de practijk gegevens bekend over de variaties die in de coëfficienten *a*, *b* en *c* kunnen optreden, dan kan men met behulp van een bundel grafieken als fig. 19 nagaan of het systeem kans loopt instabiel te worden.

Andere criteria

Sommige waardevolle gegevens zijn direct uit de oscillogrammen af te lezen, bijv. de grootte van het eerste maximum van *x*, de tijd die na een storing moet verlopen alvorens *x* binnen bepaalde grenzen blijft, de lengte van een periode (indien *x* oscillerend verloopt), enz.

Andere gegevens worden verschaft door de nauwkeurigheidsmeter, die in de electro-analoog is aangebracht. Hiermee kan men naar keuze de gemiddelde absolute waarde van *x* bepalen:

$$|\bar{x}| = \frac{1}{T}\int_0^T |x|\cdot dt,$$

of de effectieve waarde van *x*:

$$x_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T x^2 dt}.$$

Hierin is *T* de periode van de herhalingsfrequentie, waarvoor, zoals al werd vermeld, de netfrequentie is gekozen.

Men kan bij een regelaar als eis stellen dat een van deze grootheden zo klein mogelijk is. Het hangt van het geval af, of ze als criterium bruikbaar zijn, en zo ja, welke van hen het beste criterium vormt; vandaar dat in onze electro-analoog in beide mogelijkheden is voorzien.

Het opnemen van frequentiekarakteristieken

In de moderne theorie van geregelde systemen wordt veelvuldig gebruik gemaakt van frequentiekarakteristieken. Men bestudeert het gedrag van het systeem als geheel, en ook dat van onderdelen ervan, bij sinusvormige storingen. Hieruit kunnen conclusies worden getrokken omtrent de stabiliteit

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

en de kwaliteit van de regeling. Over dit onderwerp is de laatste jaren een overvloed van literatuur verschenen.

Om in het model van het regelsysteem sinusvormige storingen te kunnen aanbrengen, hebben wij de electro-analoog voorzien van een R-C-generator, waarvan de frequentie regelbaar is van 20 tot 20 000 Hz. Deze generator kan bijv. worden aangesloten op de verzameltrap S_1 van het gesloten regelcircuit (*fig. 20*). Hierdoor ontstaan sinusvormige spanningen op

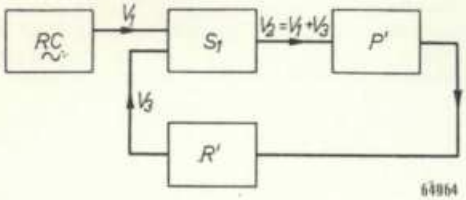


Fig. 20. Schakeling voor het opnemen van Nyquist-diagrammen aan het gesloten circuit van de proces-analoog P' en het model R' van de regelaar. De in frequentie regelbare generator RC levert een sinusvormige spanning V_1, die in de verzameltrap S_1 wordt gevoegd bij de uitgangspanning V_3 van R'.

alle punten van het circuit. Meet men van een willekeurig onderdeel de ingang- en de uitgangspanning als functie van de frequentie, dan vindt men de frequentiekarakteristiek van dit onderdeel. Hetzelfde kan men doen voor twee of meer in cascade geschakelde onderdelen, en zelfs voor de cascadeschakeling van alle onderdelen waaruit het circuit is opgebouwd. In het laatste geval kan men uit de metingen het Nyquist-diagram afleiden, waaruit, zoals bekend is, conclusies betreffende de stabiliteit zijn te trekken [6]). Meestal wordt het Nyquist-diagram opgemeten nadat het circuit ergens is opengeknipt. Indien echter de regelaar (c.q. het model) een integrator bevat, is dit niet mogelijk, omdat het opengeknipte circuit dan onstabiel is: de integraal van een toevallige sprongvormige storing zou immers onbeperkt blijven toenemen, aangezien in het opengeknipte circuit de storing niet wordt weggeregeld. Het Nyquist-criterium in zijn oorspronkelijke formulering is in dit geval niet geldig. In de literatuur zijn andere formuleringen met algemenere strekking aangegeven [7]). Het zou echter te ver voeren hier nader op in te gaan.

Modellen van de discontinu werkende regelaars

Regelaar met twee standen

Het eenvoudigste geval van een discontinu werkende regelaar is dat waarin het stuurorgaan slechts twee standen kan hebben (zoals bijv. bij een thermostaat), dus de regelende grootheid slechts twee waarden, Q_1 of Q_2, kan aannemen. *Fig. 21a* geeft het geval weer — reeds besproken in het aangehaalde artikel [1]) — waarin $Q = Q_1$ zolang de te regelen grootheid X groter is dan een critische waarde X_{cr}, en $Q = Q_2$ zolang $X < X_{cr}$; gewoonlijk richt men het zo in dat X_{cr} juist de gewenste waarde X_0 is. Tussen Q_1 en Q_2 in ligt een waarde Q_0 waarbij — indien Q deze waarde kon aannemen — onder normale bedrijfscondities X juist de gewenste waarde X_0 zou aannemen. In plaats hiervan staat het stuurorgaan beurtelings in de stand Q_1 en de stand Q_2. Wenst men over te gaan op een andere waarde van X_0, dan moet Q_0 een andere waarde krijgen. Zou echter Q_0 groter worden dan Q_2, of kleiner dan Q_1, dan werkt de regelaar niet meer.

In werkelijkheid zal gewoonlijk de overgang van Q_1 naar Q_2 niet bij precies dezelfde waarde van X geschieden als de overgang van Q_2 naar Q_1: speling in mechanische onderdelen van de regelaar bijv., of het verschil tussen de stroom waarbij een relais aantrekt en die waarbij het afvalt, heeft ten gevolge dat de sprongen plaats hebben bij verschillende waarden van X (X_1 en X_2), aan weerszijden van X_0 gelegen. In de plaats van fig. 21*a* treedt dan fig. 21*b*. Duiden we weer met q en x de afwijkingen van Q en X van de evenwichtswaarden aan, dan is $q = Q - Q_0$ en $x = X - X_0$; de regelcyclus $q = f(x)$ voor een regelaar met twee standen, met speling, heeft dan de in fig. 21*c* weergegeven vorm.

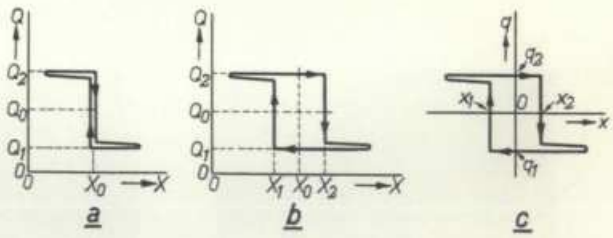


Fig. 21. Regeling met twee standen, (*a*) zonder, (*b*) en (*c*) met speling. Bij (*a*) heeft het stuurorgaan de stand overeenkomend met $Q = Q_1 < Q_0$ als X groter is dan de gewenste waarde X_0, en $Q = Q_2 > Q_0$ als $X < X_0$ (Q_0 is de — niet mogelijke — stand waarbij X, onder normale bedrijfsomstandigheden, de waarde X_0 zou aannemen). *b*): Hetzelfde, doch met speling X_1-X_2. In (*c*) zijn, voor het geval (*b*), de grootheden $q = Q - Q_0$ en $x = X - X_0$ tegen elkaar uitgezet.

De aanwezigheid van speling vermindert natuurlijk de aanspreekgevoeligheid en de nauwkeurigheid van de regeling, maar heeft ook een goede zijde. Bij een regelaar zonder speling gaat het stuurorgaan reeds bij het minste verschil tussen X en X_{cr} in de andere stand staan, bij een regelaar mèt speling gebeurt dit pas wanneer dit verschil een zekere waarde heeft bereikt. In dit laatste geval is het stuurorgaan dus minder onderhevig aan slijtage; om deze reden wordt dikwijls opzettelijk enige speling aangebracht.

Het blijkt mogelijk te zijn electrische schakelingen samen te stellen die tussen de uitgang- en de ingangspanning een soortgelijke betrekking vertonen als volgens de hysteresislus van fig. 21*c* bestaat tussen q en x. Zulk een schakeling kan dienen als electrisch model voor een regelaar met twee

[6]) H. Nyquist, Regeneration theory, Bell Syst. techn. J. **11**, 126-147, 1932. Zie ook: B. D. H. Tellegen, Philips techn. T. **2**, 292, 1937.

[7]) H. Bode, Network analysis and feedback amplifier design (Chapter VIII), New York 1945, en F. Strecker, Die elektrische Selbsterregung, Stuttgart 1947.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

standen. Voert men aan deze schakeling bijv. een sinusvormige spanning toe (x in *fig. 22*), dan is de uitgangspanning (q) blokvormig.

In de electro-analoog, die zulk een schakeling bevat, kan deze laatste met de proces-analoog worden verenigd tot een gesloten regelcircuit (*fig. 23*), waarin ook een versterker, regelbare verzwakkers en een verzameltrap zijn opgenomen. De grens $x_2 = -x_1$ is in de schakeling bepaald door een gelijkspanning; door wijziging van deze spanning

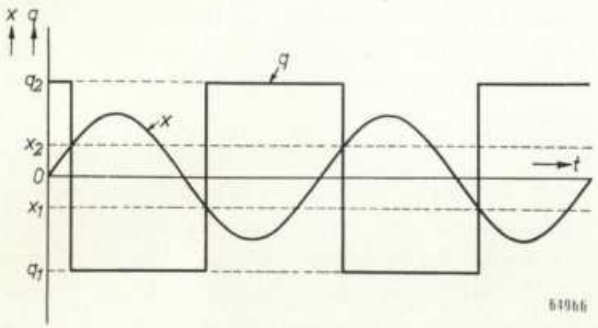


Fig. 22. Wordt aan een electrisch netwerk dat het model vormt van een regelaar met twee standen, een sinusvormige spanning x toegevoerd (met een amplitude groter dan de grenzen $x_2 = -x_1$ van de speling), dan ontstaat aan de uitgang van het netwerk een spanning q met een rechthoekige krommevorm.

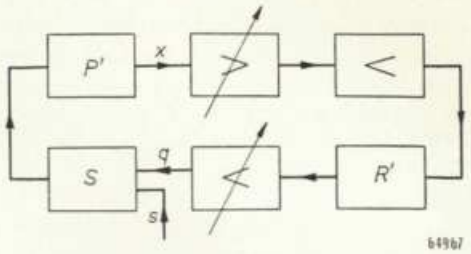


Fig. 23. Regelcircuit voor het bestuderen van discontinue regelaars (model R'). P' proces-analoog. Via de verzameltrap S kan een gelijkspanning s worden aangebracht, die het analogon vormt van een storing of van een overgang op een andere gewenste waarde in de werkelijke regelinrichting.

kan men dus de breedte van de lus variëren. Via de verzameltrap kan een gelijkspanning s worden toegevoegd, die overeenkomt met het wijzigen van Q_0 of die een wijziging van Q_0 tot gevolg heeft.

In *fig. 24a, b* en *c* zijn oscillogrammen van q en x weergegeven voor resp. $s = 0$, $s = +5$ V en $s = -5$ V. Daarbij wijzigt zich de verhouding van de intervallen waarin q de waarde q_1 resp. q_2 heeft.

Regelaar met drie standen

Door het stuurorgaan, behalve de standen Q_1 en Q_2, nog een derde, tussengelegen, stand Q_0 te geven

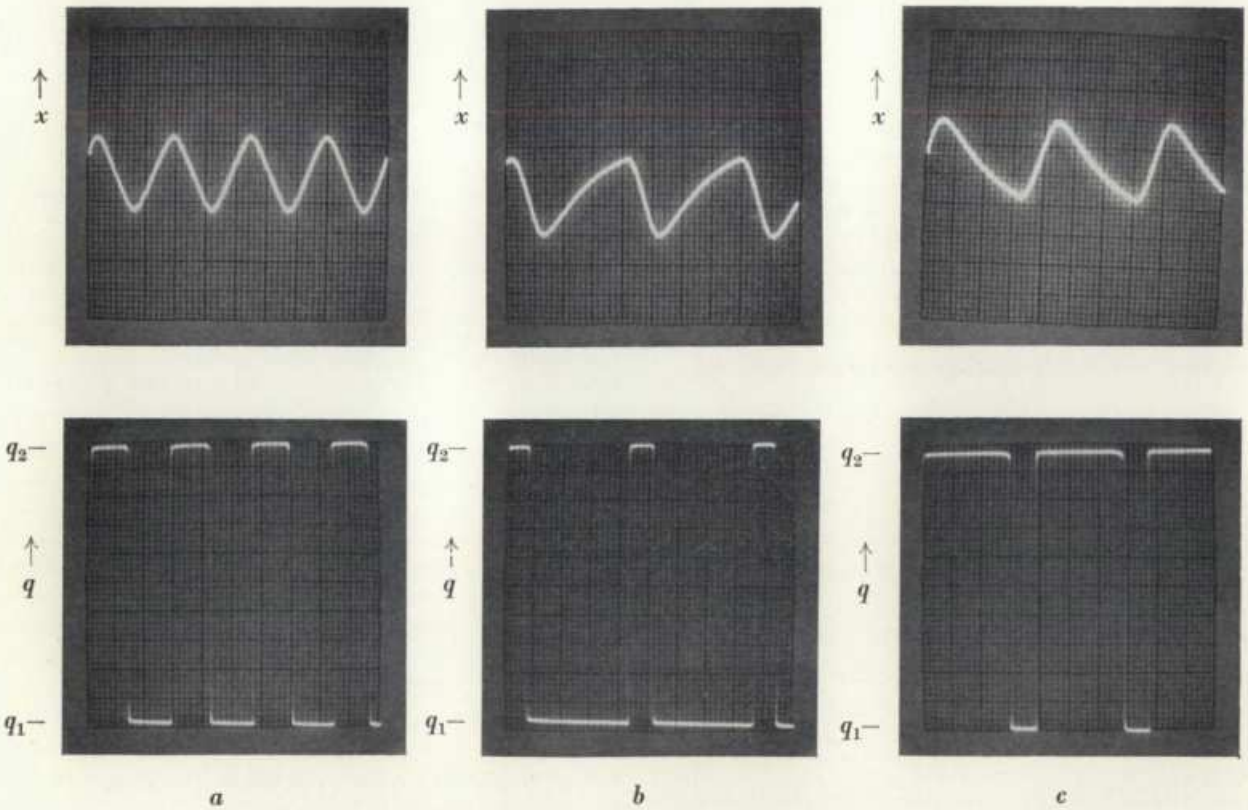


Fig. 24. Opnamen aan een circuit volgens fig. 23, met een regelaar met twee standen. In geval (a) is $s = 0$ en ligt Q_0 dus midden tussen Q_1 en Q_2 (fig. 21b). De intervallen gedurende welke $q = q_1$, resp. $= q_2$, zijn hier even lang. Bij (b) is s positief, bij (c) evenveel negatief; de intervallen waarin $q = q_1$, resp. $= q_2$, zijn nu ongelijk.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

(*fig. 25*), verkrijgt men het voordeel dat het systeem in rust is zolang X een waarde tussen X_1 en X_2 heeft, zodat het minder te lijden heeft van slijtage dan een systeem waarin een ruststand ontbreekt.

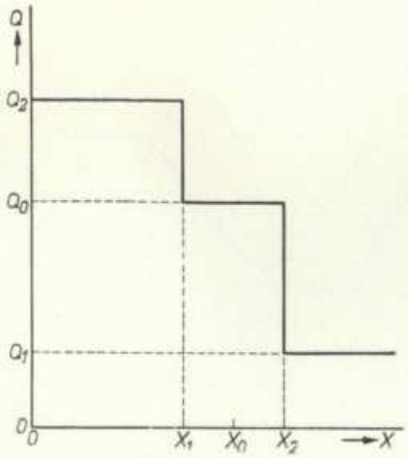


Fig. 25. Q als functie van X voor een regelaar met drie standen: behalve de standen Q_1 en Q_2 is nu ook de tussengelegen stand Q_0 mogelijk. Het stuurorgaan zal in de stand Q_0 staan zolang X_0 tussen X_1 en X_2 blijft.

Indien aanzienlijke afwijkingen van de normale bedrijfsomstandigheden slechts optreden met lange tussenpozen, kunnen de regelaar en het stuurorgaan geruime tijd achtereen in rust blijven.

Overschrijdt X, door welke oorzaak ook, de waarde X_2, dan bewerkt de regelaar dat het stuurorgaan heen en weer gaat bewegen tussen de ruststand Q_0 en de lagere stand Q_1, zodat de te hoge waarde van X wordt gecorrigeerd. De werking kan dan worden opgevat als die van een regelaar met twee standen, Q_0 en Q_1. Wordt daarentegen X kleiner dan X_1, dan gaat het stuurorgaan schommelen tussen de stand Q_0 en de hogere stand Q_2, zodat we weer schijnbaar hebben te maken met een regelaar met twee standen, nu echter met de standen Q_0 en Q_1. Daar de verschillen $Q_2 - Q_0$ en $Q_0 - Q_1$ kleiner zijn dan het verschil $Q_2 - Q_1$ bij een regelaar met twee standen, is ook de periodieke fluctuatie die in X door het telkens verspringen van het stuurorgaan ontstaat, geringer. Dit kan ook worden beschouwd als een belangrijk voordeel van een regelaar met drie standen boven een met twee standen. De bedoelde fluctuatie kan nog verder worden verkleind door het aantal standen van het stuurorgaan uit te breiden. Voert men dit aantal steeds verder op, dan nadert de trapjeskromme die de betrekking tussen Q en X weergeeft, meer en meer een rechte, en nadert de werking van de regelaar die van een continu werkende proportionele regelaar.

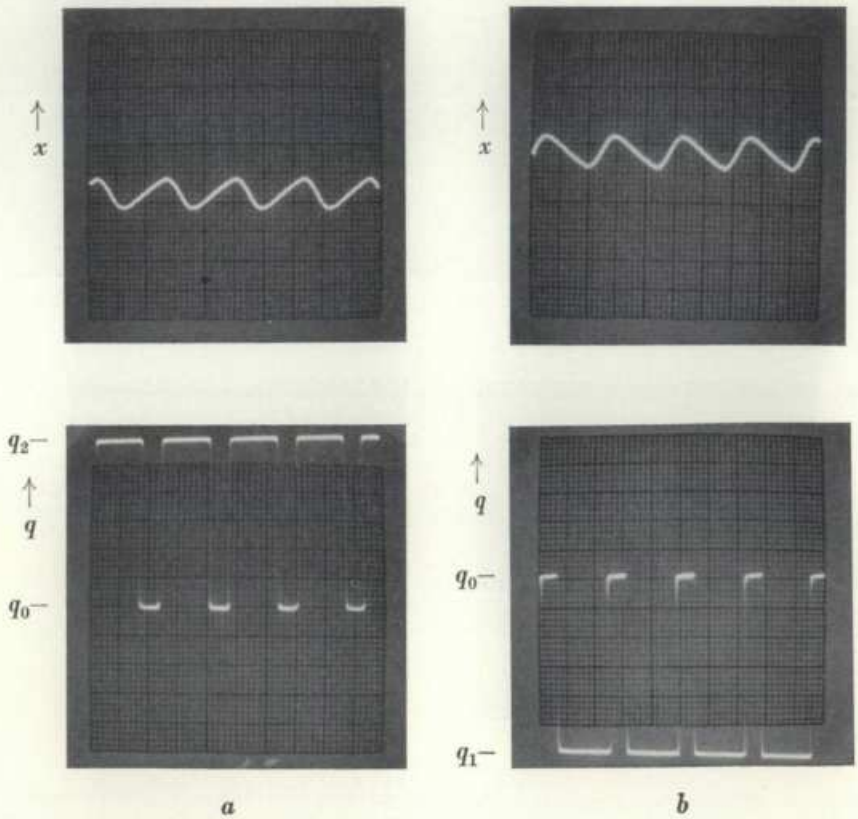


Fig. 26. Opnamen aan een circuit volgens fig. 23, met een regelaar met drie standen, (*a*) met positieve, (*b*) met even grote negatieve stoorspanning s.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De werking van een regelaar met drie standen wordt geïllustreerd door de opnamen van *fig. 26*. Hierbij werd, door het toevoegen van een positieve of een negatieve spanning s aan de ingang van de proces-analoog, het rustniveau Q_0 zodanig verschoven dat de regelaar in werking kwam en ging schommelen tussen de standen Q_0 en Q_2, resp. Q_0 en Q_1.

Regelaar met drie snelheden

In plaats van het stuurorgaan zo uit te voeren dat het slechts in bepaalde standen kan staan, kan men het ook zo inrichten dat het, al naar de grootte van x, met een bepaalde, constante, snelheid dq/dt in de ene of in de andere richting loopt, of in rust is. Bijv.:

$$dq/dt = -p \text{ als } x > x_2,$$

$$dq/dt = \quad 0 \text{ als } x_2 > x > x_1$$

en

$$dq/dt = +p \text{ als } x < x_1.$$

Technisch kan men dit bijv. verwezenlijken door de regelaar in te richten met drie standen, en deze regelaar een servomotor te laten besturen die het stuurorgaan bedient en die, al naar de stand van de regelaar, met constant toerental in de ene of in de andere richting draait, of stilstaat. De motor verstelt dan het stuurorgaan met een bedrag q dat lineair verandert met de tijd: $q = \int p\,dt = pt +$ const.

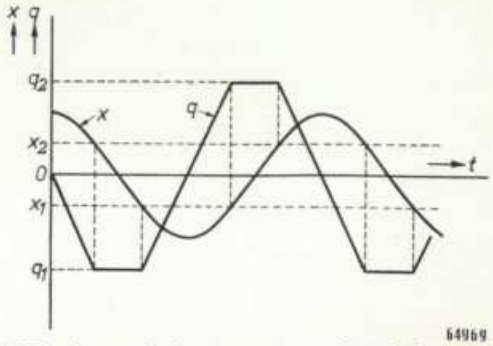


Fig. 27. Wordt aan de ingang van een electrisch netwerk dat het analogon van een regelaar met drie snelheden vormt, een wisselspanning x gelegd, dan neemt de uitgangspanning q de getekende trapeziumvorm aan.

Ten opzichte van de regelaar met drie standen heeft de regelaar met drie snelheden het voordeel dat bij een blijvende verandering van de normale (gemiddelde) bedrijfsomstandigheden de motor zorgt voor een blijvende verstelling van het stuurorgaan.

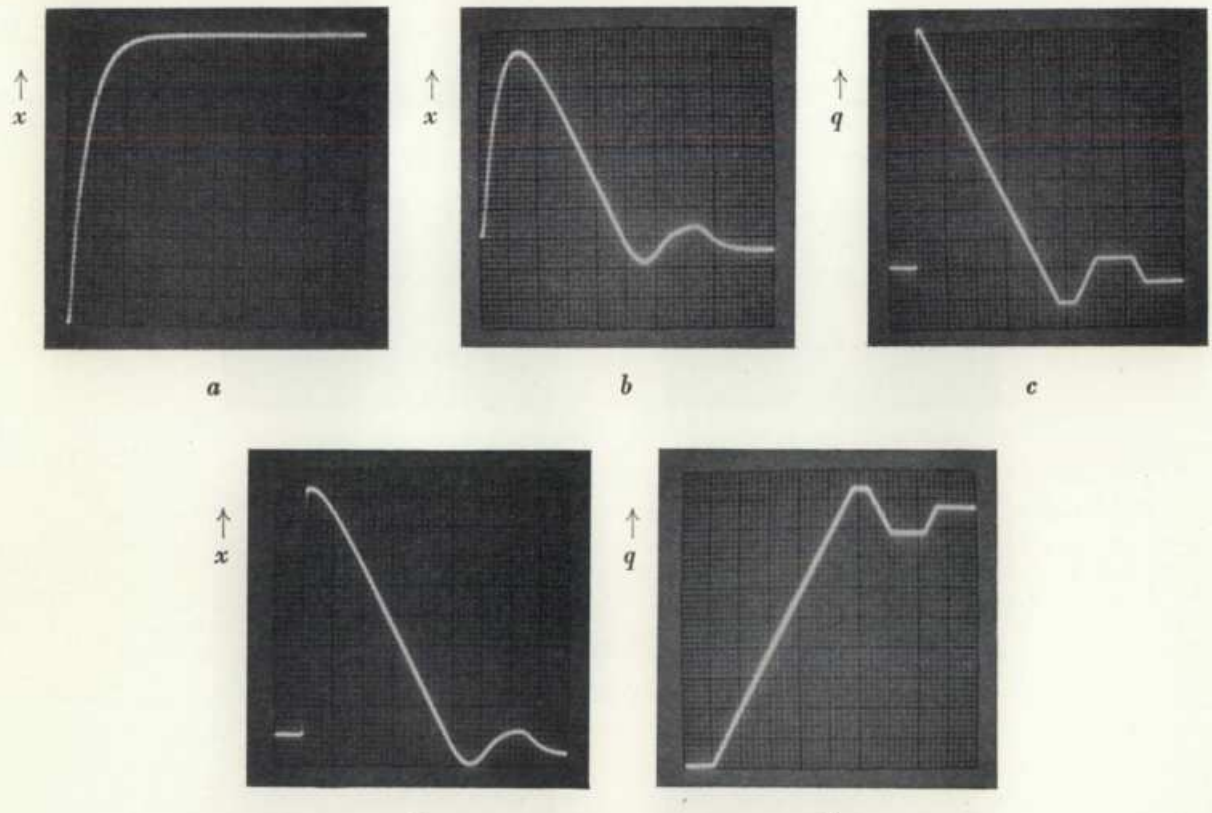


Fig. 28. *a*) Sprongkarakteristiek van een proces-analoog, die, tezamen met een regelaar met drie snelheden, een regelcircuit vormde waaraan de oscillogrammen (*b*) - (*e*) zijn opgenomen. (*b*) en (*c*) stellen het verloop van x resp. q voor bij een sprongvormige storing aan de ingang van het proces, (*d*) en (*e*) dezelfde grootheden bij een storing aan de uitgang.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

In een electrisch model kan de functie van de motor worden vervuld door een integrerend netwerk. Wordt de uitgangspanning ($-p$, $+p$ of 0) van een regelaarmodel met drie standen gelegd aan een integrerend netwerk, dan ontstaat aan de uitgang van dit netwerk een spanning q die lineair met de tijd toe- resp. afneemt, resp. constant is, analoog dus met de verstelling van het stuurorgaan.

Legt men aan de ingang van de regelaar bijv. een sinusvormige spanning (met amplitude groter dan x_2), dan is gemakkelijk in te zien (*fig. 27*) dat aan de uitgang van de integrator een trapeziumvormige spanning ontstaat.

Fig. 28 toont enige oscillogrammen die zijn opgenomen aan een regelcircuit dat bestaat uit een proces-analoog, een regelaar met drie standen en een integrator. Fig. 28*a* is de sprongkarakteristiek van de gebruikte proces-analoog. Een sprongvormige storing aan de ingang van de proces-analoog (overeenkomende met een plotselinge verstelling van het stuurorgaan) geeft de in fig. 28*b* afgebeelde verandering x van de geregelde grootheid, die op haar beurt de spanning q aan de ingang van de proces-analoog doet verlopen volgens fig. 28*c*. De gevolgen van een sprongvormige storing aan de uitgang van de proces-analoog zijn te zien in fig. 28 *d* en *e*, resp. ter plaatse van de ingang en van de uitgang van het proces. In beide gevallen komt x in de eindtoestand tot rust bij een waarde tussen x_1 en x_2.

Uit de gegeven voorbeelden zal genoegzaam zijn gebleken welk een waardevol hulpmiddel de electro-analoog is voor het bestuderen van regelprocessen. Details van de electrische schakeling van diverse onderdelen als de universele proces-analoog, de verzameltrappen, integratoren en differentiatoren, zijn in het bovenstaande met opzet achterwege gelaten. Zij zullen het onderwerp vormen van een volgend artikel.

Samenvatting. Onder de benaming „electro-analoog" wordt verstaan een apparatuur waarmee electrische modellen van regelinrichtingen kunnen worden samengesteld en bestudeerd. De besproken electro-analoog bevat in de eerste plaats een universeel model van het te regelen proces; dit model bestaat uit een electrisch netwerk — in hoofdzaak een vertragingsnetwerk — aan welks sprongkarakteristiek, die op een oscillograaf wordt zichtbaar gemaakt, men een vorm kan geven gelijk aan die van een willekeurig na te bootsen proces. Voorts zijn in de electro-analoog electrische modellen van continu en van bepaalde discontinu werkende regelaars aangebracht. In het model van de continu werkende regelaar kunnen een proportionele term, een enkel en een dubbel integrerende term en een enkel en een dubbel differentiërende term worden gerealiseerd.

Nadat men het model van het proces de juiste karakteristiek heeft gegeven, wordt het met een van de regelaarmodellen verenigd tot een gesloten regelcircuit. Door op een geschikt punt een sprongvormige storing toe te voeren, kan men het gedrag van het circuit oscillografisch bestuderen bij verschillende waarden van de parameters. In het bijzonder kan men daarbij nagaan wanneer instabiliteit intreedt en hoe groot de onnauwkeurigheid van de regeling is. Oscillogrammen worden gegeven voor verscheidene gevallen, zowel met continu als met discontinu werkende regelaars.

Op de electrische uitvoering van de voornaamste onderdelen zal in een volgend artikel worden ingegaan.

OVERZICHT VAN RECENTE WETENSCHAPPELIJKE PUBLICATIES DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

Van deze publicaties, voor zover niet met een sterretje * gemerkt, verstrekt de Administratie van het Natuurkundig Laboratorium, Kastanjelaan, Eindhoven, op aanvrage overdrukken.

1923: C. J. Dippel: The metal-diazonium process (Photographic Journal **90 B**, 34-41, 1950, No. 2).

Overzicht van de voornaamste karakteristieke eigenschappen van het metaal-diazonium-proces voor fotografische reproductie. Het latente beeld, gevormd door een organische verbinding die door het licht wordt ontleed, wordt omgezet in een latent beeld gevormd door kwikdruppeltjes, dat daarna door physische ontwikkeling wordt omgezet in een zilverbeeld. Van belang is vooral het grote oplossend vermogen van dit nieuwe proces (1200 lijnen per mm).

1924: J. M. Stevels: Quelques nouveautés dans les recherches sur le verre (Verres et Réfractaires **4**, 3-9, 1950, No. 1).

Beschrijving van „poederglas" en zijn toepassingen (zie Philips technisch T. **8**, 2-7, 1946) en van bladglas (zie Philips Res. Rep. **1**, 129-134, 1946). Dit laatste bestaat uit schilfers van ca 1 mm² oppervlak en 1 tot 5 μ dik, die door sedimentatie in een geschikte vloeistof vlak op elkaar gestapeld worden en door cohaesiekrachten samenhangen, waarna de vloeistof wordt afgezogen. In vochtige toestand kan het gedeformeerd worden. In droge toestand kan het mica vervangen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Ten slotte worden een aantal laag smeltende glazen vermeld, met grote weerstand en kleine diëlectrische verliezen. Als voorbeeld wordt genoemd een glas bestaande uit 45% SiO_2, 32% PbO, 5% CaF_2, 4% Na_2O en 14% K_2O (gew. %), dat aan ijzer kan worden gesmolten. De belangrijkste eigenschappen (weerstand en verlieshoek als functie van temperatuur en frequentie) worden in grafieken weergegeven.

1925: G. Diemer en J. L. H. Jonker: Secondary emission valve wide-band amplifier for decimeter waves (Wireless Eng. **27**, 137-143, Mei 1950).

Beschrijving van een experimentele radiobuis bestemd voor roosterbasisschakeling en voorzien van één vermenigvuldigingstrap waarin gebruik wordt gemaakt van secundaire emissie. De verhouding van steilheid tot capaciteit is groot (3,0 mA/V·pF). Daardoor is de buis bruikbaar voor brede-band-versterkers in die gevallen waar een klein ruisgetal niet van belang is. Bij $\lambda = 1$ m bedraagt de versterking 30 dB bij een bandbreedte van 3,5 MHz: bij $\lambda = 50$ cm resp. $\lambda = 30$ cm zijn deze waarden 20 dB bij 20 MHz resp. 10 dB bij 10 MHz. De maximale opbrengst is ongeveer 1,5 W voor $\lambda = 1$ m. Bij $\lambda = 7$ m is het ruisgetal 12 dB. Deze vrij hoge waarde wordt veroorzaakt door het geruis van de secundaire emissie. Bij bepaalde instelling van de spanningen blijkt dit secundaire-emissiegeruis enigszins te worden gecompenseerd door de ruimtelading tussen het secundair emitterende oppervlak en de anode.

1926: E. W. Gorter: Saturation magnetization of ferrites with spinel structure (Nature, London **165**, 798-800, 20 Mei 1950).

Het magnetisch moment per molecuul M_s, van verbindingen van de gedaante $x\ ZnFe_2O_4 + (1 - x)\ Me^{II}Fe_2O_4$ (Me^{II} = tweewaardig metaal) is bij de temperaturen van vloeibare zuurstof en vloeibare stikstof gemeten en uitgezet als functie van x. De krommen vertonen een maximum in de buurt van $x = 0{,}4$; de raaklijnen bij $x = 0$ convergeren naar een punt $M_s = 10$ Bohr-magnetonen bij $x = 1$. De resultaten geven een bevestiging van de theorie van Néel.

R137: G. Diemer en J. L. H. Jonker: On the time delay of secondary emission (Philips Res. Rep. **5**, 161-172, 1950, No. 3).

De grensfrequentie van een schijfdynatron blijkt 2400 MHz te zijn. Hieruit volgt een bovenste grens van $3 \cdot 10^{-11}$ sec voor de traagheid van de secundaire emissie. Metingen van de admittantie van een dynatron voor zeer hoge frequenties (u.h.f.) bij 300 MHz bewijzen dat de traagheid kleiner moet zijn dan 10^{-11} sec. Uit looptijdeffecten in het secundair emitterende materiaal volgt theoretisch een bovenste grens van 10^{-14} à 10^{-15} sec.

R138: E. J. W. Verwey, P. W. Haaijman, F. C. Romeijn en G. W. van Oosterhout: Controlled-valency semiconducters (Philips Res. Rep. **5**, 173-187, 1950, No. 3).

Uitvoerige behandeling van het onderwerp dat reeds is besproken onder No. **1895**.

R139: R. A. Hutner, E. S. Rittner en F. K. du Pré: Fermi levels in semiconducters (Philips Res. Rep. **5**, 188-204, 1950, No. 3).

Er worden algemene formules afgeleid voor de bepaling van het Fermi-niveau en de dichtheid van vrije ladingdragers in halfgeleiders. Speciale modellen van halfgeleiders worden nauwkeurig onderzocht en een aantal toepassingen worden besproken.

R140: J. M. L. Janssen: A cathode-ray oscillograph for periodic phenomena of high frequencies (Philips Res. Rep. **5**, 205-240, 1950, No. 3).

Beschrijving van een „stroboscopische" oscillograaf voor de bestudering van hoogfrequente periodieke verschijnselen. Een getrouw laagfrequent beeld wordt verkregen door het hoogfrequente signaal te mengen met spanningsimpulsen die in faze zijn gemoduleerd. De bandbreedte en de maximale aftastsnelheid van de oscillograaf worden bestudeerd als functie van de impulsfrequentie en de impulsbreedte. Verder worden het synchronisatiecircuit, het mengcircuit en de impulsgenerator beschreven (zie ook Philips techn. T. **12**, 52-59 en 73-82, 1950, No. 2 en 3).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!